



M 2014

FABRICO DE CARROÇARIA DE AUTOCARRO POR ENROLAMENTO FILAMENTAR: PROCESSO DE INDUSTRIALIZAÇÃO E CUSTO DO CICLO DE VIDA

TIAGO ANDRÉ JESUS MOREIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA

À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM

ENGENHARIA INDUSTRIAL E GESTÃO

**Fabrico de carroçaria de autocarro por enrolamento filamentar:
processo de industrialização e custo do ciclo de vida**

Tiago André Jesus Moreira

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Nuno Soares

Orientador na FEUP: Prof. Torres Marques



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Industrial e Gestão

2014-09-22

Ao Guilherme

Resumo

A preocupação ambiental da comunidade industrial tem levado a grandes investimentos por parte das empresas que visam sobretudo minimizar os impactos das emissões de gases poluentes para a saúde pública. A inovação e utilização de materiais menos prejudiciais para o ambiente contribuem para atingir esse objetivo. Este projeto centra-se na implementação deste tipo de soluções, no âmbito de uma empresa de construção de carroçarias para autocarros de aeroporto.

Neste projeto estudou-se a viabilidade estrutural e económica da construção de uma carroçaria de autocarro de aeroporto, através da técnica de enrolamento filamentar, originando uma estrutura em sanduíche com um núcleo em PVC – Policloreto de Vinil, com a resistência estrutural requerida e que reduzisse o tempo de ciclo total na montagem do autocarro. Tal foi possível devido à maior integração de componentes que esta técnica construtiva permite. Foi feito ainda um estudo comparativo do Custo do Ciclo de Vida - LCC- da solução apresentada com a existente, identificando-se uma série de vantagens competitivas adquiridas com a produção deste novo modelo de autocarro de aeroporto.

As vantagens operacionais conseguidas são muito significativas, conseguindo-se uma redução de custos com o combustível na ordem dos 1,7 milhões de euros anuais, numa frota de dez autocarros. Se considerarmos que o custo do combustível tem tendência a subir, como a nossa realidade económica o prevê, então este valor será ainda mais significativo. No contexto económico atual este fator torna-se preponderante na tomada de decisão de uma empresa de gestão aeroportuária. Menos custos, maior responsabilidade social (menos emissões de gases poluentes) e estar na vanguarda da inovação, utilizando veículos construídos com as técnicas de fabrico de topo poderão vir a ser fatores de diferenciação.

Manufacturing of a filament wound bus body: industrialization process and life cycle cost

Abstract

Environmental concerns of the industrial community have led to large investments by companies aiming to minimize the impact of greenhouse gas emissions on public health. Innovation and use of less harmful materials to the environment contribute to achieve this goal. This project centers on the implementation of such solutions within a company building airport bus bodies.

This project studied the structural and economical feasibility of building a body of shuttle bus through the filament winding technique, creating a sandwich structure with a core PVC - Polyvinyl chloride, with the required structural strength and to reduce the total cycle time in assembling the bus. This was possible due to the greater integration of components that this construction technique allows. A comparative study of the Life Cycle Cost - LCC - was done between the presented solution and the existing one, and within a series of competitive advantages being identified with the production of this new model of airport shuttle bus.

Operational advantages obtained are very significant, achieving a reduction of fuel costs in the order of 1.7 million of euros annually, in a ten bus fleet. Considering that the cost of fuel is expected to rise, the gains will be even more significant. In the current economic context this factor becomes preponderant in the decision making of an airport management company. Lower costs, greater social responsibility (less greenhouse gas emissions) and to be at the forefront of innovation, using vehicles built with top manufacturing techniques are likely to be the differentiating factors.

Agradecimentos

Gostaria de neste espaço deixar uma palavra de agradecimento a todos os que contribuíram para que eu conseguisse desenvolver este projeto direta ou indiretamente.

Começo por agradecer a hospitalidade de todos na CaetanoBus S.A., que de uma forma ou de outra, contribuíram para que eu me sentisse bem enquanto lá estive. Em particular deixar o meu agradecimento ao Eng.º José Costa que foi o meu elo de ligação com a empresa e com os restantes colaboradores e que, dentro das suas possibilidades, me prestou todo o apoio necessário. Ao Eng.º Rodrigo Coelho pela ajuda prestada que me permitiu inteirar acerca do COBUS.

Em relação aos meus orientadores a minha primeira palavra de agradecimento vai para o Professor António Torres Marques pela oportunidade, pela confiança em mim depositada e por todos os esforços que fez para que o meu projeto fosse bem-sucedido. Ao Professor Nuno Soares como orientador principal agradeço todas as reuniões, toda a disponibilidade para me tirar dúvidas e a preocupação contínua com o desenrolar do projeto.

Agradeço também à Inês Machado pela paciência nas nossas argumentações e pela ajuda prestada.

Agradecer aos meus amigos mais próximos que me apoiaram e incentivaram ao longo destes meses com particular referência à Cláudia Moutinho que foi incansável.

Por fim deixar um agradecimento especial e único ao meu pai que, ao longo destes anos da minha vida, me tem apoiado da melhor forma nas minhas decisões e por me permitir chegar tão longe academicamente – OBRIGADO PAI!

Índice de Conteúdos

1. Introdução	1
1.1. Apresentação da CaetanoBus	1
1.2. Enquadramento do projeto na CaetanoBus	2
1.3. Método do projeto	3
1.4. Temas abordados e sua organização	3
2. Revisão do Estado da Arte	4
2.1. Compósitos	4
2.2. Processos de fabrico utilizando PRFV	5
2.3. Critério de rotura de Hashin	12
2.4. Reciclagem	13
2.5. Soluções de autocarros em materiais compósitos existentes	14
2.6. Painéis sanduiche	17
3. LCC – Custo do Ciclo de Vida.....	18
4. Conceitos da Análise de projeto de investimento	21
5. Considerações e trabalho prévio.....	21
5.1. Ponto de partida.....	21
5.2. Escolha dos materiais	21
5.3. Seleção do processo de fabrico	22
5.4. Descrição dos modelos existentes.....	23
5.5. Organização da parte fabril	24
6. Projeto realizado	27
6.1. Módulo AEROFEUPBUS	27
6.1.1. Cálculo de resistência estrutural da versão 2.....	28
6.1.2. Propagação de dano na versão 2.....	29
6.1.3. Execução técnica do fabrico	30
6.2. Reorganização da linha de produção.....	31
6.3. Acabamento da carroçaria	32
6.4. Previsão de vendas do COBUS	32
6.5. Poupança associada à redução de mão-de-obra.....	33
6.6. Comparação de custo entre COBUS e AEROFEUPBUS	34
7. Análise do projeto de investimento	38
8. Vantagens competitivas do AEROFEUPBUS e LCC	43

9. Conclusões e trabalhos futuros	45
ANEXO A - Organigrama da CaetanoBus.....	50
ANEXO B - Propriedades das fibras utilizadas habitualmente	51
ANEXO C - Propriedades das resinas utilizadas habitualmente	52
ANEXO D - Custo de diferentes processos de fabrico com diferentes matrizes e fibras	53
ANEXO E – Ficha técnica do alumínio 6106 (www.nedalextrusion.com)	54
ANEXO F – Lista de peças constituintes do módulo central do COBUS	55
ANEXO H – Imagens representativas do início de propagação de dano do AEROFEUPBUS versão 2.....	57

Siglas

CIVITAS – *Cleaner and Better Transport in Cities*;

COBUS – Autocarro de Aeroporto;

PRFV- Fibra de vidro;

GGF – Gastos Gerais de Fabrico;

HPL - High Permeability Layers (Camadas de elevada permeabilidade);

LCC – *Life Cycle Cost* (Custo do ciclo de vida);

NABI – North American Bus Industry (Indústria de Autocarros Norte-Americana);

PVC - *Polyvinyl chloride* (Policloreto de vinil);

RTM - *Resin Transfer Molding* (Moldagem por transferência de resina);

SCRIMP - *Seemann Composites Resin Infusion Molding Process* (Processo “*Seamann*” de moldagem de compósitos por infusão de resina);

SRIM - *Structural Reaction Injection Molding* (Moldação por injeção de reação estrutural);

VAL - Valor Atual Líquido;

VALA - Valor Atual Líquido Ajustado;

VARTM - *Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding* (Moldagem por transferência de resina assistida por vácuo);

VIP - *Vacuum Infusion Process* (Processo de infusão por vácuo);

Índice de Figuras

Figura 1 – Cobus 3000	2
Figura 2 – Execução de processo de moldação por vácuo (Fonte: Almeida 2013).....	6
Figura 3 – Camara de Autoclave (Fonte: US F1 Team, 2009 ©).....	7
Figura 4 – Sistema de VARTM utilizando HPL's para construção de painel sanduíche (Fonte: Dai, Pellaton e Hahn, 2004).....	9
Figura 5– Esquema de funcionamento de máquina de enrolamento filamentar (Fonte: CPIC Fiberglass)	10
Figura 6 – Enrolamento helicoidal cruzado.....	11
Figura 7 – Enrolamento circunferencial	11
Figura 8 – Comparação entre a resistência específica e o módulo específico de alguns compósitos com alguns metais (Fonte: Hoffman, 2008).....	11
Figura 9 – Torre de teste de materiais (Fonte: Composites Update 2009).....	11
Figura 10 – Capacidade de absorção de energia específica do aço, alumínio e de um compósito (Fonte: Kindervater e Georgi, 2010).....	12
Figura 11 – Potenciais processos de reciclagem de materiais compósitos termoendurecíveis (adaptado de Goodship, 2010).....	14
Figura 12 – CompoBus Metro 45C – 2FW nas ruas de Los Angeles (Fonte: www.iho.hu)....	15
Figura 13 – CIVITAS no polo Universitário da Asprela (Fonte: http://www.dsprojects.blogspot.pt)	16
Figura 14 – EcoRide™ BE35 (Fonte: Quick, 2010)	16
Figura 15 – <i>Low Floor Bus</i> da Hankuk Fiber (Fonte: www.busworld.org)	17
Figura 16 – Rigidez específica (Módulo de Young/densidade (GPa/Kg/m ³) vs preço (€/kg)) para os materiais anteriormente indicados (Fonte: CES EduPack 2013)	21
Figura 17 - Resistência específica (Tensão limite de elasticidade/densidade (MPa/Kg/m ³) vs preço (€/kg)) para os materiais anteriormente indicados (Fonte: CES EduPack 2013)	22
Figura 18 – Desenho simplificado do módulo central escolhido para o estudo	24
Figura 19 – Encadeamento de Secções na CaetanoBus	25
Figura 20 – Representação dos apoios e da aceleração aos quais o módulo está sujeito	29
Figura 21 – Imagem representativa do início de propagação do dano da matriz à tração para o módulo AEROFEUPBUS versão 2 (com reforço), sujeito a uma aceleração vertical de 3 g ..	30
Figura 22 – Previsões de venda do COBUS para os próximos 5 anos (Fonte: CaetanoBus)....	33

Figura 23 – Gráfico representativo do custo de uma carroçaria das diferentes alternativas para a CaetanoBus	36
Figura 24 – Número de dias necessários ao <i>payback</i> do Investimento	41
Figura 25 – Módulo sem reforço, sujeito a uma aceleração vertical de 3 g – falha das fibras à compressão	57
Figura 26 - Módulo sem reforço, sujeito a uma aceleração vertical de 3 g – falha das fibras à tração	57
Figura 27 - Módulo sem reforço, sujeito a uma aceleração vertical de 3 g – falha da matriz à compressão	58
Figura 28 - Módulo sem reforço, sujeito a uma aceleração vertical de 3 g – falha das fibras à tração	58
Figura 29 - Módulo com reforço, sujeito a uma aceleração vertical de 3 g – falha das fibras à compressão	59
Figura 30 - Módulo com reforço, sujeito a uma aceleração vertical de 3 g – falha das fibras à tração	59
Figura 31 - Módulo com reforço, sujeito a uma aceleração vertical de 3 g – falha da matriz à compressão	60
Figura 32 - Módulo com reforço, sujeito a uma aceleração lateral de 1,25 g – falha das fibras à compressão	60
Figura 33 - Módulo com reforço, sujeito a uma aceleração lateral de 1,25 g – falha das fibras à tração	61
Figura 34 - Módulo com reforço, sujeito a uma aceleração lateral de 1,25 g – falha da matriz à compressão	61
Figura 35 - Módulo com reforço, sujeito a uma aceleração lateral de 1,25 g – falha da matriz à tração	62
Figura 36 - Módulo com reforço, sujeito a uma aceleração longitudinal de 0,75 g – falha das fibras à compressão	62
Figura 37 - Módulo com reforço, sujeito a uma aceleração longitudinal de 0,75 g – falha das fibras à tração.....	63
Figura 38 - Módulo com reforço, sujeito a uma aceleração longitudinal de 0,75 g – falha da matriz à compressão	63
Figura 39 - Módulo com reforço, sujeito a uma aceleração longitudinal de 0,75 g – falha da matriz à tração	64

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Valor associado à redução de peso de diferentes tipos de Aeronaves (Fonte: Jones, 1999).....	5
Tabela 2 – Critérios de Hashin para o caso bidimensional das tensões (Fonte: Candeias, 2009)	13
TABELA 3 – ELEMENTOS DE CUSTO CONSIDERADOS NUM MODELO DE LCC (FONTE: VOLPE, 2011)	20
Tabela 4 – Rigidez específica, resistência específica e preço da PRFV do tipo E e da fibra de carbono (Fonte: CES EduPack 2013)	22
Tabela 5 – Propriedade do laminado utilizado no FEUPBUS (Fonte: Almeida, 2013).....	23
Tabela 6 – Informações do modelo COBUS (Fonte: CaetanoBus).....	24
Tabela 7 - Distribuição de trabalho nos dois primeiros postos da secção das estruturas	25
Tabela 8- Vendas de COBUS nos últimos 5 anos	26
Tabela 9 – Materiais principais utilizados no fabrico do módulo do AEROFEUPBUS versão 1 (quantidades adaptadas de Almeida, 2013)	27
Tabela 10 – Valores de início de propagação de dano do módulo AEROFEUPBUS (Fonte: Almeida, 2013)	28
Tabela 11 – Valores máximos obtidos pelo <i>software</i> de simulação Abaqus/CAE 6.12 para a propagação de dano de Hashin (1980) no AEROFEUPBUS versão 2.....	30
Tabela 12 – Nova distribuição do trabalho nos dois primeiros postos da secção das estruturas	32
Tabela 13 – Redução de horas no fabrico do modelo AEROFEUPBUS em relação ao COBUS	34
Tabela 14 – Aumento de autocarros produzidos do modelo AEROFEUPBUS em relação ao COBUS em função do nº de horas de mão-de-obra disponíveis	34
Tabela 15 – Peso e composição resumida dos diferentes modelos de carroçaria.....	35
Tabela 16 – Custo atual da carroçaria COBUS e Orçamento da empresa A e B para venda de cada carroçaria em compósito e o respetivo mandril	35
Tabela 17 – Variação de custo de mão-de-obra na montagem do COBUS vs AEROFEUPBUS	36
Tabela 18 – Custos relacionados com o investimento (<i>Cash flow</i> de Investimento)	38
Tabela 19 – Poupança estimada na construção do AEROFEUPBUS (<i>Cash flow</i> de Exploração).....	39
Tabela 20 - <i>Cash Flow</i> de Financiamento e cálculo do VA_{CFF}	39

Tabela 21 - <i>Cash Flows</i> Operacionais atualizados relativos à versão 2 do AEROFEUPBUS e VAL _{base}	40
Tabela 22 – Plano de pagamento do financiamento	42
Tabela 23 – Poupança anual de combustível do AEROFEUPBUS versão 2 em relação ao COBUS	43
Tabela 24 - Valores comparativos de LCC entre o COBUS e o AEROFEUPBUS Versão 2..	44

1. Introdução

Na comunidade industrial existe uma crescente concorrência e preocupação ambiental por parte das empresas. Tal facto, conduz a grandes investimentos a longo prazo que visam, sobretudo, a redução de emissões de gases poluentes. Como o segundo maior contribuinte para o efeito de estufa na Europa, a indústria dos transportes tem atenção especial a esta questão (European Environment Agency, 2008).

A presente dissertação irá abordar esta problemática no âmbito do fabrico de uma carroçaria em material compósito através de enrolamento filamentar, como alternativa à construção comum de autocarros com estruturas metálicas.

Para além da questão ambiental, a segurança do condutor e dos passageiros em relação a choques frontais e capotamento constitui outro problema identificado por esta indústria. Deste modo, este estudo procurou avaliar a possibilidade de construir um autocarro em estrutura sanduíche, uma vez que, as estruturas em sanduíche são normalmente utilizadas devido à sua alta resistência e módulo específicos, revelando-se por isso, uma mais-valia para a indústria dos transportes (Ko, Shin, Jeon e Cho, 2008). Com a utilização de carroçarias em sanduíche obtidas por enrolamento filamentar, esta indústria tem que respeitar uma série de requisitos, dos quais fazem parte a resistência ao choque, maior segurança para os passageiros, acústica adequada, redução de danos para pedestres em caso de acidente, fácil reparação em caso de acidente e redução do tempo de montagem (Neves, Fernandes, e Ferreira, 2009).

1.1. Apresentação da CaetanoBus

A empresa CaetanoBus foi criada em 2002 numa parceria com a Daymlier-Chrysler, dedicando-se ao fabrico de carroçarias para autocarros, através da utilização dos chassis disponibilizados pelas diferentes marcas para todos os segmentos do mercado de pesados de passageiros e ligeiros de passageiros. É uma empresa que, devido à grande flexibilidade produtiva de que dispõe, fabrica cada autocarro em função das necessidades do cliente.

A sua experiência na construção de estruturas para autocarros remonta a 1946, quando iniciou o fabrico de carroçarias compostas essencialmente por madeira. Mais tarde, em 1955, evoluíram para a construção totalmente metálica, sendo o Grupo Salvador Caetano o pioneiro em Portugal. Em 1967, foram exportados para Inglaterra os primeiros autocarros e em 1990 iniciaram a produção do COBUS (autocarro para plataformas de aeroporto). Em 2010, o Grupo Salvador Caetano adquiriu a participação da Daimler-Chrysler na CaetanoBus e tornou-se no único acionista da empresa. Durante este período, a empresa CaetanoBus recebeu, tanto em Portugal como em Inglaterra alguns prémios e certificações de qualidade relevantes, dos quais se destacam (CaetanoBus S.A.):

- a) 1994 – Modelo Óptimo é eleito o “Autocarro Mini/Midi do ano” em Inglaterra;
- b) 1996 – É atribuída a certificação de Qualidade segundo a Norma NP EN ISSO 9001:1995;
- c) 1999 – O Centro Português do Design atribui prémio ao modelo Enigma;
- d) 2005 – Primeiro autocarro na Europa com acessibilidade a deficientes pela porta da frente;
- e) 2009 - O Centro Português do Design atribui prémio Sena da Silva (na categoria de Equipamento/Industrial) ao modelo COBUS 3001.

Com todo o historial apresentado sem dúvida que a CaetanoBus, no setor dos pesados de passageiros, é uma empresa de referência nacional e internacional, com capacidade para desenvolver projetos de vanguarda devido ao *know-how* adquirido.

1.2. Enquadramento do projeto na CaetanoBus

O presente projeto desenvolveu-se no Departamento de Engenharia da CaetanoBus (ENG1 – Desenvolvimento de Chassis e Veículos Urbanos), do qual fazem parte os responsáveis pelo desenvolvimento do chassis e da estrutura, pela parte elétrica e pela parte pneumática e hidráulica. Ver anexo A.

A carroçaria do autocarro que vai constituir objeto de estudo desta dissertação, o COBUS 3000 (Figura 1), é construída essencialmente em perfil de alumínio extrudido, com cerca de 3 metros de largura, 14 metros de comprimento e 3 metros de altura. Apresenta capacidade para transportar até 112 passageiros, sendo o seu peso em vazio de 12 toneladas.

No sentido de melhorar continuamente os processos produtivos, a CaetanoBus tem procurado ser, cada vez mais, uma empresa líder de mercado no campo da inovação. Após reflexão, os responsáveis da empresa, sentiram a necessidade de estudar a possibilidade de fabrico de carroçarias para os COBUS em material compósito.

Deste modo, este processo permite à CaetanoBus (através de uma redução do peso da carroçaria no conjunto) flexibilizar as motorizações (menos potência nos motores) ou aumentar o número máximo de passageiros, construindo o autocarro com um material que tem características mecânicas superiores, nomeadamente ao nível da rigidez e resistência específicas. Para além disso, consegue ainda reduzir a mão-de-obra na montagem, melhorar a integração de componentes e tornar-se numa empresa mais responsável ambientalmente ao reduzir as emissões de dióxido de carbono na utilização e fabrico dos autocarros, de fluoretos, dióxido de enxofre (SO₂), poeira e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP) associadas à sua construção.

Este estudo, procura analisar as vantagens e desvantagens da construção do COBUS em alumínio, comparativamente com uma carroçaria equivalente, em sanduíche, obtida por enrolamento filamentar, denominada ao longo desta dissertação por AEROFEUPBUS, tendo como ponto de partida um estudo prévio realizado por Almeida (2013).



FIGURA 1 – COBUS 3000

Este projeto, ao estimar os custos, vai permitir à CaetanoBus uma avaliação da viabilidade económica da construção de um autocarro como o AEROFEUPBUS, bem como uma comparação direta de custos entre as opções.

1.3. Método do projeto

Este estudo incide sobre o COBUS 3000, associando a redução de peso conseguida e a redução de mão-de-obra na sua montagem devida a uma maior integração de componentes. O objetivo deste estudo é fazer uma análise comparativa entre os custos envolvidos na compra e montagem da estrutura em alumínio com a compra e montagem da estrutura em fibra de vidro (PRFV). Assim, será contabilizado todo o material que constitui a estrutura em alumínio do COBUS 3000 e estimada a mão-de-obra necessária à sua montagem. Com isto, existirá um termo comparativo com a estrutura em sanduíche de PRFV com espuma de Policloreto de vinil (PVC). Todos os elementos comuns ao COBUS e ao AEROFEUPBUS não vão ser parte integrante deste estudo.

Relativamente ao AEROFEUPBUS vão ser analisados os diferentes fornecedores possíveis, e os custos na sua implementação decorrentes da mudança na linha de produção e, deste modo, perceber a variabilidade de preços. Vão igualmente considerar-se dois tipos de carroçarias em alternativa ao COBUS: a primeira em que são respeitados os *standards* para circulação na via pública e uma segunda que respeitará os mesmos standards que o COBUS, sendo sujeita ao mesmo tipo de testes teóricos (simulação de lomba, travagem brusca e curva apertada). Com esta análise, será possível comparar diretamente as opções (AEROFEUPBUS e COBUS) e ainda ter uma ideia da exequibilidade do AEROFEUPBUS para circulação na via pública.

1.4. Temas abordados e sua organização

O presente relatório começa por fazer uma abordagem aos compósitos de uma forma geral, indicando as escolhas e o seu motivo ao longo do mesmo. No seguimento do relatório vão fazer-se algumas suposições, explicar o projeto e apresentar as respetivas soluções. Para finalizar vão tirar-se algumas conclusões e mencionar propostas de trabalhos futuros.

No capítulo 2 vai fazer-se uma breve introdução aos compósitos, à sua reciclagem e aos modelos existentes de autocarros produzidos em material compósito. No capítulo 3 explica-se o conceito de LCC, as vantagens e desvantagens e alguns dos diferentes modelos normalmente aplicados. No capítulo 4 vão ser apresentadas as fórmulas necessárias à avaliação do projeto como um investimento.

No capítulo 5 inicia-se a parte mais prática desta dissertação, apresentando o trabalho de análise prévia, as considerações necessárias e introduz-se a análise modular. O capítulo 6 apresenta o trabalho realizado e os testes de resistência aplicados ao AEROFEUPBUS. No capítulo 7 encontra-se uma análise deste projeto como um investimento e por fim no capítulo 8 apresentam-se as vantagens competitivas para a CaetanoBus, caso opte pelo fabrico do AEROFEUPBUS e o respetivo LCC.

No capítulo 9 apresentam-se as conclusões finais deste estudo e referem-se algumas abordagens possíveis a este tema no futuro.

2. Revisão do Estado da Arte

Nesta secção vão ser introduzidos os materiais compósitos, as técnicas de fabrico a eles associadas, a forma como podem ser reciclados e reaproveitados e ainda as soluções existentes de autocarros construídos neste tipo de material.

2.1. Compósitos

Os compósitos são materiais estruturais que consistem na combinação entre dois ou mais constituintes ao nível macroscópico e que não são solúveis entre eles. A um chamam-se fibras e ao outro matriz. A matriz confere a estrutura ao material compósito, preenchendo os espaços vazios entre as fibras e também transmite a carga ao longo das fibras. (Gay e Hoa, 2007)

Cada fibra é um filamento e, um feixe de fibras, é um roving composto por milhares de filamentos, cada filamento geralmente tem entre 5 e 20 μm e existem em diversos materiais, nomeadamente:

- a) Carboneto de Silício (para altas temperaturas);
- b) Aramido ou Kevlar® (muito leve);
- c) Carbono (elevado módulo ou elevada força - 5 μm);
- d) Vidro (20 μm).

No anexo B podem observar-se as características das fibras mais utilizadas. As fibras suportam as cargas, fornecem resistência, rigidez e estabilidade térmica.

As matrizes estão distribuídas por 3 grandes grupos:

- a) Metálicas (alumínio, titânio)
- b) Minerais (carboneto de silicone, carbono)
- c) Poliméricas (resinas termoplásticas e resinas termoendurecíveis)

No anexo C encontram-se as matrizes poliméricas mais comumente usadas e as suas principais características. Estas têm como função manter as fibras do reforço unidas, distribuir-lhes as cargas e dar forma à estrutura.

No que concerne aos de matriz polimérica (termoplásticos), estes formam-se da adição de uma resina (e.g. epóxido, viniléster ou poliésteres insaturados) a uma matriz (e.g. PRFV, fibra de carbono, fibras aramídicas). Os termoplásticos são utilizados em diversas áreas desde a construção civil (e.g. tubagens de água, isolamento de fios), medicina (e.g. equipamento resistente ao calor, tratamento de hérnias), indústria automóvel (e.g. baterias, rolamentos, viseiras de capacetes, faróis) até à restauração (e.g. embalagens de comida reutilizáveis). Os termoendurecíveis são utilizados na aviação (e.g. asas e corpo central), na indústria automóvel (e.g. competição e veículos de gama alta) e na construção civil (e.g. banheiras e piscinas).

Os compósitos no geral têm vindo a desenvolver-se ao longo dos últimos anos de uma forma rápida. O facto de possuírem excelentes propriedades mecânicas têm feito destes, elementos muito estudados e sobre os quais há muito aprofundamento de conhecimento. O vasto leque de benefícios do uso de materiais compósitos em diversas aplicações tem vindo a criar um mercado para este género de materiais desde a aviação até ao setor automóvel passando pela construção civil onde a sua importância é extrema.

Em grande parte dos casos os compósitos são mais eficientes estruturalmente (menos peso para um melhor desempenho mecânico) e economicamente (devido à redução de peso conseguida com a sua utilização) que os restantes materiais. Na aviação, onde o mercado é extremamente competitivo, uma redução de 0,453 kg de massa num avião comercial pode originar uma poupança até 1360 litros de combustível anualmente. Isto tem provocado um rápido desenvolvimento dos compósitos no mercado da aviação já que 25% dos custos totais de operação destas empresas são relacionados com o combustível (Kaw, 2006). Na Tabela 1 pode verificar-se o valor teórico associado à redução de peso em diferentes estruturas (Jones, 1999) caso se opte por este tipo de solução.

Pequena Aeronave civil	\$55/Kg
Helicóptero	\$110/Kg
Motores das Aeronaves	\$440/Kg
Aeronaves de combate	\$440/Kg
Aeronaves Comerciais	\$880/Kg
Satélites próximos de orbita	\$2200/Kg
Satélites síncronos	\$22000/Kg
Nave espacial	\$33000/Kg

TABELA 1 – VALOR TEÓRICO ASSOCIADO À REDUÇÃO DE PESO DE DIFERENTES TIPOS DE AERONAVES (FONTE: JONES, 1999)

2.2. Processos de fabrico utilizando PRFV

Há inúmeros processos para a fabricação de materiais compósitos, no entanto, apenas vão ser referidos os que se consideram melhores para servir de base à construção de uma estrutura de um autocarro. Estes são:

- a) Moldação por vácuo
- b) Autoclave
- c) Enrolamento filamentar
- d) Moldação por injeção

Os preços associados a cada um dos processos de fabrico variam conforme a complexidade do processo e o material utilizado. Salienta-se, no anexo D a enorme disparidade de custo entre compósitos produzidos em grande volume e os compósitos de alta performance (Gay e Hoa, 2007).

- a) Moldação por vácuo (Almeida, 2013)

De seguida apresenta-se a sucessão de acontecimentos na moldação por vácuo, explicando detalhadamente os passos a seguir ao aplicar este processo de fabrico.

- I. Aplicação de desmoldante;
- II. Aplicar camada de *gel-coat* para conferir a cor pretendida à peça (diferentes pigmentações) e para dar um acabamento tão regular como o do contramolde;
- III. Aplicar uma camada de reforço, já com alguma resina impregnada;

- IV. Colocar filme para facilitar separação entre o saco de vácuo e a peça;
- V. Colocar filme perfurado para comprimir a peça e permitir a saída do ar;
- VI. Camada absorvente para eliminar excessos de resina;
- VII. Colocar vedante para selagem perfeita;
- VIII. Colocar filme plástico e conectar à bomba de vácuo;
- IX. Fazer vácuo ao filme (0,15 a 1 bar).

Na figura 2 é possível observar como se encontra o molde no fim dos passos anteriormente enumerados.

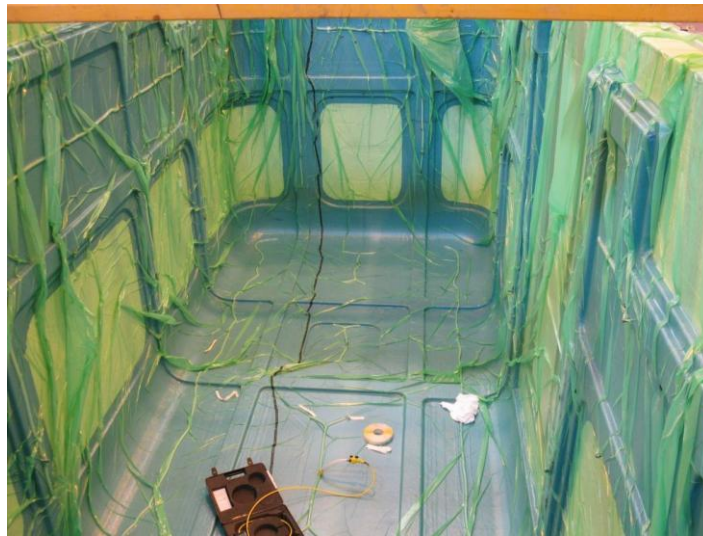


FIGURA 2 – EXECUÇÃO DE PROCESSO DE MOLDAÇÃO POR VÁCUO (FONTE: ALMEIDA 2013)

A moldação por vácuo tem as suas vantagens e as suas desvantagens. Uma das grandes vantagens deste processo é o facto de se conseguirem peças homogéneas, com uma qualidade elevada de acabamento e menos porosas do que na moldação manual. Além disto, é de notar que a saúde dos operários é muito menos prejudicada devido à inexistência de resina líquida (não curada) eliminando assim materiais ou gases em excesso.

O facto de as peças serem obtidas recorrendo ao vácuo faz com que a resina penetre uniformemente nas fibras num processo limpo e económico em termos de equipamento direto necessário e poupança de material e consegue-se neste processo uma elevada compactação do laminado final. Assim, a moldação por vácuo é uma ótima solução para peças de grandes dimensões, muito embora o equipamento auxiliar para a cura (autoclave ou estufa) e para armazenamento dos pré impregnados (arcas frigoríficas) sejam caros. No caso de peças mais complexas torna-se difícil aplicar o saco de vácuo e existem despesas não recuperáveis em filme desmoldante, material absorvente, saco de vácuo, além deste processo exigir mão-de-obra especializada.

b) Autoclave

O processo de autoclave é um processo caro, que requer equipamento especializado e mão-de-obra especializada. O início do processo aproxima-se do descrito anteriormente (moldação por vácuo) mas, o vácuo é efetuado dentro do autoclave (que é pressurizado) e onde é aquecido até à temperatura de cura pretendida (o que exige um cuidado extra na

escolha do material para o saco de vácuo). No entanto, os gases libertados durante o processo de cura podem ser um problema em ambiente pressurizado pois são altamente inflamáveis. Como tal, o aumento de temperatura tem que ser inversamente proporcional à pressão dentro do autoclave. Em suma, este processo é ótimo para conseguir peças com boas características mecânicas, ligeiras e com formatos complexos mas, é necessária muita atenção à conjugação dos três fatores essenciais à qualidade da peça: temperatura, vácuo e pressão na camara devidamente adequados.

Tal como no processo anterior a moldação por autoclave apresenta vantagens e desvantagens. Por conseguinte, em peças de elevada espessura, por exemplo, a uniformização da resina é muito melhor devido à utilização de altas pressões; o facto de se utilizar vácuo evita também resina em excesso nas peças; o processo de cura é muito mais rápido devido à utilização de altas temperaturas e, dependentemente do tamanho do autoclave e das peças a serem produzidas, existe a possibilidade de serem produzidas várias peças em simultâneo. Por outro lado, o facto de o equipamento ser dispendioso e de se tornarem de difícil execução as peças mais complexas com raios de curvatura reduzidos (principalmente na execução do vácuo), obriga à necessidade de mão-de-obra especializada no controlo do processo, constituindo assim desvantagens do processo de autoclave (Mazumdar, 2002). Na figura 3 encontra-se uma câmara de autoclave.



FIGURA 3 – CAMARA DE AUTOCLAVE (FONTE: US F1 TEAM, 2009 ©)

c) Moldação por injeção

Na moldação por injeção podemos utilizar várias técnicas/processos para produzir as peças, nomeadamente:

- i. VARTM: *Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding*;
- ii. RTM: *Resin Transfer Molding*;
- iii. SCRIMP: *Seemann Composites Resin Infusion Molding Process*;
- iv. SRIM: *Structural Reaction Injection Molding*;
- v. VIP: *Vacuum Infusion Process*.

O SCRIMP é um novo processo de VARTM que respeita as regulamentações ambientais extremamente rigorosas existentes e que confere à peça excelentes propriedades

mecânicas (Sun, Li e Lee, 2004). Vão analisar-se com mais atenção os processos de VARTM, RTM e SRIM que são os de maior interesse para a presente tese.

i. VARTM

Comparativamente com o tradicional RTM o VARTM permite poupanças significativos em termos de custo de ferramentas, pois requer apenas um molde de uma peça um saco de vácuo utilizado para fechar o molde. Deste modo para estruturas em sandwich de tamanho considerável, como cascos de navios, o VARTM é considerado o método de fabrico com melhor relação custo-benefício (Dai, Pellaton e Hahn, 2004).

Como pontos negativos deste processo aponta-se a dificuldade de automação do mesmo e, a fraca qualidade de acabamento superficial no lado da peça moldado pelo saco de vácuo. Na figura 4 pode observar-se como funciona um sistema de VARTM utilizando HPL - *High Permeability Layers*.

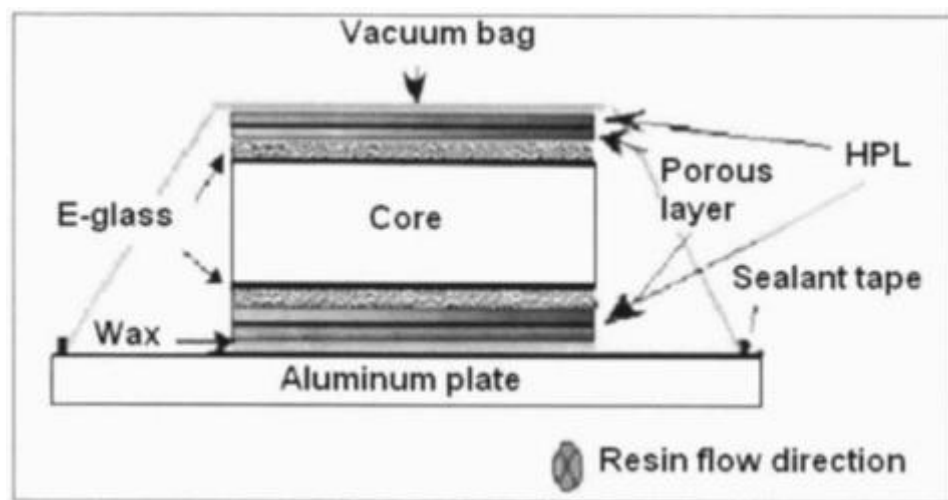


FIGURA 4 – SISTEMA DE VARTM UTILIZANDO HPL'S PARA CONSTRUÇÃO DE PAINEL SANDUÍCHE (FONTE: DAI, PELLATON E HAHN, 2004)

O VARTM consiste em colocar um reforço preformado num molde aberto. Neste molde é aplicada cera antes do reforço para facilitar a desmoldagem aquando da finalização da cura. Posteriormente aplica-se uma camada de tecido fino e poroso (*peel-ply*) que não adere à matriz e que facilita a desmoldagem no final. Na camada posterior coloca-se um material de alta permeabilidade (filme micro-perfurado) para aumentar a velocidade de fluxo de resina e permitir uma impregnação uniforme e por fim o saco de vácuo selado na entrada de resina e na saída do ar para a bomba de vácuo. O tempo de cura após a impregnação vai ser determinado pela combinação entre o tipo de resina e o endurecedor utilizado na impregnação (Dhyani, 2008)

ii. RTM

O processo de RTM é uma tecnologia de fabrico que permite a construção de peças tridimensionais, complexas e de grande dimensão com grande potencial de automatizar. As vantagens do RTM são o facto de serem peças produzidas em molde fechado, com boa qualidade de acabamento nas duas faces da peça e a possibilidade de produção em serie (Töpker e Michaeli, 2001). A injeção de resina é automática e em molde fechado o que provoca uma libertação reduzida de vapores de estireno.

Neste processo é aplicado um agente desmoldante (normalmente a cera) no molde e no contramolde, é colocado o reforço no meio do molde e do contramolde e é injetada a resina a baixa pressão. Esta impregnação ocorre lenta e progressivamente no reforço, expulsando o ar no interior do molde para o exterior. O tempo de cura, tal como no processo de VARTM, depende da resina utilizada e do endurecedor. O facto de ser um molde e um contramolde encarece a produção dos mesmos e por vezes, em peças mais complexas, é também de muito difícil produção.

iii. SRIM

As parecenças do SRIM com o processo de RTM são muitas. O processamento do molde e do contramolde são idênticos e a maior diferença, prende-se com a injeção de resina. No SRIM é injetada uma mistura de duas resinas que, ao reagirem uma com a outra, aceleram a sua polimerização, sendo desnecessário o aquecimento do molde e do contramolde para acelerar a cura. A resina é normalmente de baixa viscosidade, a sua mistura é feita numa antecâmara antes de entrar para o molde e isso facilita a sua distribuição uniforme pela fibra (Mazumdar, 2002).

d) Enrolamento Filamentar

O enrolamento filamental é utilizado no fabrico de peças em compósito normalmente cilíndricas ou simétricas em relação ao eixo e ocas. Pode observar-se na figura 5 o esquema de funcionamento de uma máquina de enrolamento filamental.

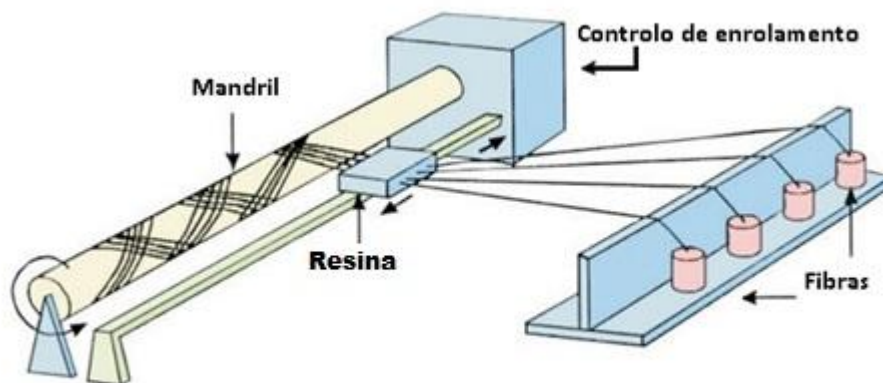


FIGURA 5– ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE MÁQUINA DE ENROLAMENTO FILAMENTAR
(FONTE: CPIC FIBERGLASS)

O enrolamento pode ser feito com fibras pré-impregnadas, com fibras impregnadas passando-as por um banho quente de resina antes do mandril (enrolamento húmido) ou podem ainda ser enroladas a seco, sendo possível posteriormente impregna-las através, por exemplo do processo de VARTM – *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding* (Moldação por transferência de resina assistida por vácuo). Os filamentos de fibra são colocados sob tensão antes do mandril e, no caso da utilização de resina termoplástica, é aplicado calor à fibra em simultâneo com o enrolamento. No caso dos termoendurecíveis a cura das peças pode ser realizada em autoclave, em estufa específica ou na própria máquina de enrolamento (Advani e Sozer, 2003).

Uma máquina de enrolamento filamental comum possui um eixo rotativo, onde é colocado o mandril e, acoplado a este, tem um eixo que transporta os filamentos longitudinalmente ao longo de todo o mandril, movendo-se paralelamente ao seu eixo. Isto permite que o enrolamento da PRFV seja efetuado com o ângulo pretendido em relação ao eixo do mandril.

O ângulo de enrolamento em relação ao eixo do mandril deve ser escolhido tendo em consideração as limitações da máquina que vai efetuar o enrolamento. Na escolha do ângulo de enrolamento deve ter-se especial atenção às cargas a que a peça vai estar sujeita pois, isto influencia a distribuição de forças ao longo da peça.

O enrolamento filamental é uma técnica usada na construção de perfis tubulares existindo 2 tipos principais de enrolamento:

- Enrolamento helicoidal cruzado (Figura 6): Este tipo de enrolamento requer mais cuidado no enrolamento para que as fibras fiquem uniformemente distribuídas. Dependentemente da razão entre a velocidade de rotação do mandril e da carruagem de alimentação de PRFV, os reforços são geralmente enrolados entre os 15 e os 85°. Tal permite a obtenção de peças completamente fechadas, obrigando para isso a um equipamento de enrolamento filamental mais sofisticado e com mais eixos de movimentação para distribuição dos filamentos nos polos do mandril (Rosato e Grove, 1964);

- Enrolamento circunferencial (Figura 7): É um enrolamento perpendicular ao mandril com um reforço circunferencial. Obtém-se desta forma um laminado com múltiplas camadas unidireccionais perpendiculares ao eixo do mandril e a sua resistência estrutural é encontrada na região circunferencial, onde as fibras são solicitadas à tração. Utiliza-se quando é necessário garantir propriedades de alta qualidade na direção do enrolamento (Rosato e Grove, 1964).

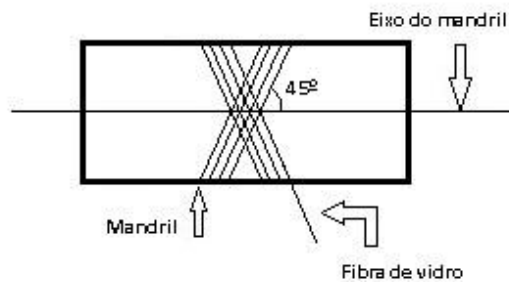


FIGURA 6 – ENROLAMENTO HELICOIDAL CRUZADO

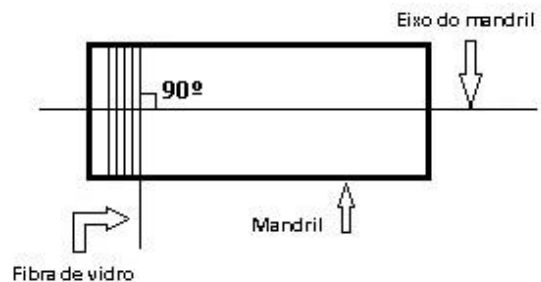


FIGURA 7 – ENROLAMENTO CIRCUNFERENCIAL

Em suma, os compósitos conseguem uma resistência mecânica superior, apesar da densidade reduzida em relação a materiais como o aço ou o alumínio. A figura 8 demonstra a resistência específica vs módulo específico e os resultados são claros: se compararmos a PRFV do tipo E reforçada com epóxico com materiais como aço, alumínio ou magnésio, a resistência específica destas fibras é superior, embora o módulo específico seja um pouco inferior.

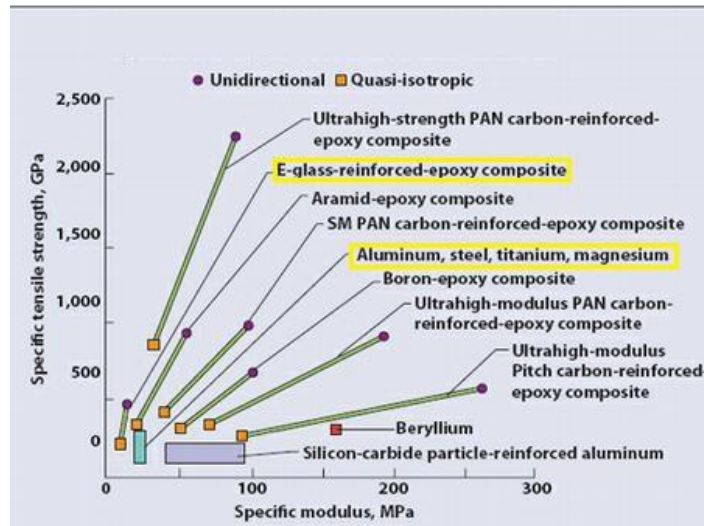


FIGURA 8 – COMPARAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA ESPECÍFICA E O MÓDULO ESPECÍFICO DE ALGUNS COMPÓSITOS COM ALGUNS METAIS (FONTE: HOFFMAN, 2008)

O futuro dos materiais compósitos passa, atualmente, pelo desenvolvimento da tecnologia para o fabrico de compósitos poliméricos de elevada rigidez e supercondutores de três componentes (Kim, Noh e Youn, 2014)

Para criar uma base de dados com o comportamento dos elementos genéricos de compósitos em relação à absorção de energia, foram efetuados muitos testes dinâmicos e séries de testes quase-estáticos (teste da torre - figura 9). Na figura 10 encontra-se um comparativo deste teste entre o aço, o alumínio e material compósito que nos mostra a capacidade de absorção de energia específica de cada um dos provetes (Kindervater e Georgi, 2010).

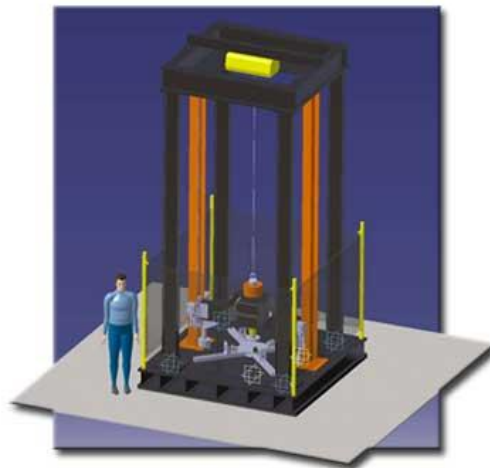


FIGURA 9 – TORRE DE TESTE DE MATERIAIS (FONTE: COMPOSITES UPDATE 2009)

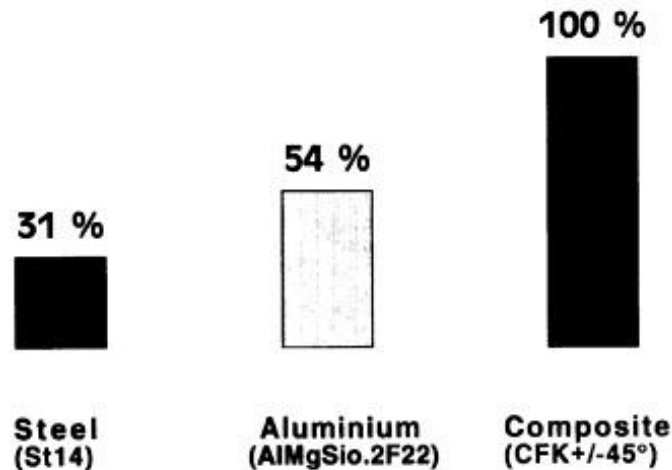


FIGURA 10 – CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ENERGIA ESPECÍFICA DO AÇO, ALUMÍNIO E DE UM COMPÓSITO (FONTE: KINDERVATER E GEORGI, 2010)

2.3. Critério de rotura de Hashin

O critério de Hashin parte do princípio que para se conseguir prever a falha de um material compósito é necessário conhecer os seus mecanismos de falha e, a partir daí, saber-se-á quando e como o material vai ceder com maior precisão. A partir daqui, existem duas propostas de Hashin para a rotura de materiais compósitos. Na primeira, de uma forma mais simplificada, para um estado biaxial de tensões (Hashin e Rotem, 1973) e na segunda, de uma forma mais complexa, para um estado tridimensional de tensões – Hashin, 1980 (Candeias, 2009).

É interessante estudar o critério de rotura de Hashin, inicialmente para o estado bidimensional e posteriormente, para o estado tridimensional. As propostas originais baseiam-se nas hipóteses seguintes:

- Considerar separadamente os mecanismos de falha (matriz, fibra, compressão e tração);
- Considera-se, no modo de falha da matriz, que são as componentes do vetor tensão no plano de falha as responsáveis por esta;
- Supõe-se quadrática a interação entre os componentes distintos intervenientes no modo de falha.

Tanto o critério 2D (Hashin e Rotem, 1973), como o critério 3D (Hashin, 1980) estimam mecanismos de falha de uma lâmina de material compósito. A falha da fibra (FF) e a falha da matriz (FM) baseiam-se na observação da forma de rotura de uma lâmina unidirecional em que as fibras estão distribuídas segundo um ângulo de orientação. Na tabela 2 apresentam-se os critérios de Hashin para o caso bidimensional.

Modos de Falha	Hashin 1973	Hashin 1980
Falha da Fibra à Tracção (FFT)	$\sigma_{11} = X_T$ $(\sigma_{11}, X_T > 0)$	$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1 \quad (\sigma_{11} > 0)$
Falha da Fibra à Compressão (FFC)	$ \sigma_{11} = X_T$ $(\sigma_{11} < 0, X_C > 0)$	$ \sigma_{11} = X_T \quad (\sigma_{11} < 0, X_C > 0)$
Falha da Matriz à Tracção (FMT)	$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1$ $(\sigma_{22} > 0)$	$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1 \quad (\sigma_{22} > 0)$
Falha da Matriz à Compressão (FMC)	$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_C}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1$ $(\sigma_{22} < 0)$	$\left(\frac{\sigma_{22}}{2 \cdot S_T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_C}{2 \cdot S_T}\right)^2 - 1\right] \cdot \frac{\sigma_{22}}{Y_C} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1$ $(\sigma_{22} < 0)$

TABELA 2 – CRITÉRIOS DE HASHIN PARA O CASO BIDIMENSIONAL DAS TENSÕES (FONTE: CANDEIAS, 2009)

Este tema é de importância extrema para o projeto considerado. A necessidade de estabilidade estrutural é inerente a qualquer estrutura de autocarro e, no contexto deste projeto, foram utilizados os critérios de rotura de Hashin para determinar se a estrutura que se propõe construir, respeita os critérios a que se propõe.

2.4. Reciclagem

O objetivo dos processos de reciclagem é reduzir o impacto ambiental dos materiais, reutilizando-os de uma forma mais sustentável (Goodship, 2010). A reciclagem dos compósitos termoendurecíveis é possível embora, comparativamente com os compósitos termoplásticos, ainda está pouco difundida e desenvolvida. Os termoplásticos são completamente reutilizáveis ao serem fundidos e novamente transformados em matéria-prima (Goodship, 2007). No entanto, o que torna o processo de reciclagem de termoendurecíveis muito difícil, são as cadeias ligações cruzadas que estes apresentam, impossibilitando a sua fundição e reutilização. Existem dois processos de reciclagem para os termoendurecíveis: a reciclagem mecânica e a reciclagem térmica. Na figura 11 observam-se os caminhos que a reciclagem destes compósitos pode seguir.

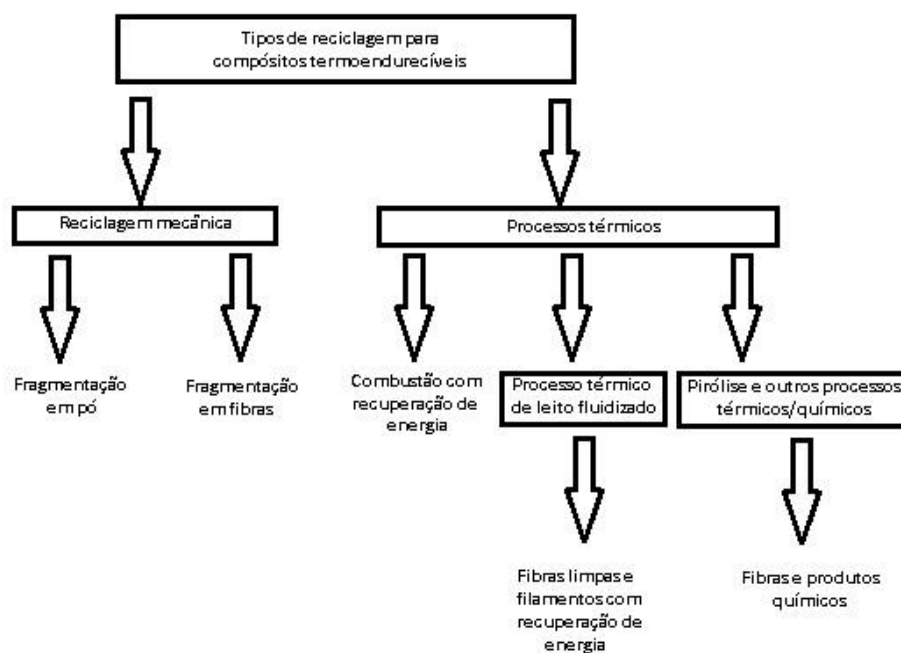


FIGURA 11 – POTENCIAIS PROCESSOS DE RECICLAGEM DE MATERIAIS COMPÓSITOS TERMOENDURECÍVEIS (ADAPTADO DE GOODSHIP, 2010)

O rápido crescimento na utilização de materiais compósitos no mercado Brasileiro fez com que se criasse mais uma forma de negócio, rentabilizando assim todo o desperdício destes, através da criação de uma empresa denominada por “*Devolva*” que se dedica à reciclagem de materiais compósitos. Conforme é citado na edição de 2014 da revista “Perfil do setor brasileiro de materiais compósitos”, desde que o sistema foi criado em 2010, “o *Devolva* atende a várias companhias, realizando a coleta, à destinação e a certificação dos seus resíduos”. Isto leva-nos a um dos principais benefícios de uso de material compósito que é a sua classificação como material sustentável.

Na aviação, cada vez mais, é importante esta reciclagem pois cerca de 50% do peso dos novos boeing 787, por exemplo, é em material compósito. Todos os anos na Europa são fabricados cerca de um milhão de toneladas de materiais compósitos, sendo o seu reaproveitamento crucial para a sustentabilidade do globo (Cerruti et al., 2014) (Crump, 2009).

No caso particular do setor dos Pesados de Passageiros, há poucas empresas no mundo a apostarem na construção através de materiais compósitos, pelo que não existe informação de fim de vida destes autocarros relativamente à sua reciclagem.

2.5. Soluções de autocarros em materiais compósitos existentes

Seguem-se alguns exemplos de autocarros em materiais compósitos construídos em todo o mundo.

NABI Bus – CompoBus Metro 45C – 2FW

A NABI desenvolveu e colocou no mercado Norte-Americano este modelo de sucesso (Figura 12), que foi produzido em 2003-2005 e em 2008-2013 e onde foi conseguida uma redução de peso na ordem dos 900 kg numa estrutura de autocarro de 13 metros. O modelo

substituto deste, tem um chassis composto não só por PRFV mas também por alumínio e denomina-se por NABI BRT.



FIGURA 12 – COMPOBUS METRO 45C – 2FW NAS RUAS DE LOS ANGELES (FONTE: WWW.IHO.HU)

CIVITAS FEUP

O CIVITAS (*Cleaner and Better Transport in Cities*) (figura 13) foi um projeto concluído em 2012 que visava a melhoria da acessibilidade na zona urbana do Porto, coordenado pela Câmara Municipal do Porto em parceria com a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e a *Cleaner and Better Transport in Cities* (CIVITAS).

O CIVITAS foi projetado a partir de um mini autocarro da Toyota modelo Coaster, sobre o qual foi executada a carroçaria em resina de viniléster, reforçada com PRFV do tipo E através do processo de SCRIMP (*Seamann Composites Resin Infusion Molding Process*). Foi produzido com base em molde aberto sendo construído em duas partes distintas e realizadas separadamente que, à *posteriori*, são coladas através de adesivos estruturais. Cada uma das partes é feita em sanduíche de duas folhas de PRFV impregnada em resina de cada um dos lados e, no meio, uma camada de espuma de PVC (que procura aumentar a resistência e melhorar acústica e termicamente o autocarro). Com este processo conseguem-se peças com bom acabamento superficial e constata-se uma redução de peso na ordem dos 20% face à versão original.



FIGURA 13 – CIVITAS NO POLO UNIVERSITÁRIO DA ASPRELA (FONTE: [HTTP://WWW.DSFPJECTS.BLOGSPOT.PT](http://www.dsfpjects.blogspot.pt))

Mobile Energy Solutions LLC & Proterra LLC – EcoRide™ BE35

É uma solução de transporte coletivo de passageiros que começou a ser produzido em 2004 sob o nome da empresa Mobile Energy Solutions LLC. Desde 2008, que o nome da empresa mudou para Proterra LLC e que houve evoluções ao nível estrutural e motriz. A primeira versão destes autocarros, entre 2004 e 2008, é elétrico e apresenta um chassis/estrutura completamente em compósito, cujos sistemas de suspensão e transmissão são montados diretamente no chassis de PRFV. Devido aos péssimos resultados operacionais habitualmente apresentados pelas empresas de transportes de passageiros, a Proterra decidiu fazer este tipo de construção em que o autocarro em compósito se liga a pequenos pedaços estruturais em aço, onde se encontram alojados os sistemas motrizes e de suspensão dos autocarros. Isto tornou os autocarros 20 a 40% mais leves, reduzindo assim emissões poluentes e consumos, melhorando a resistência da estrutura e tornando-a, por isso, mais fácil de reparar em caso de acidente. A capacidade de transporte de passageiros também aumenta, bem como a capacidade da estrutura não ser afetada pelas condicionantes atmosféricas (Figura 14). (Composites World, 2009)



FIGURA 14 – ECO RIDE™ BE35 (FONTE: QUICK, 2010)

Hankuk Fiber

A Hankuk Fiber colocou dois modelos de estruturas de pesados de passageiros em PRFV no mercado Sul-Coreano e, o primeiro, denominou-o de “*Low-Floor Bus*” (Figura 12). Este autocarro apresenta um degrau de acesso muito próximo do chão (25-34 cm) o que facilita o acesso tanto a grávidas, crianças, idosos bem como a pessoas de mobilidade reduzida. O segundo modelo denominado “*Eletric Bus*”, apresenta uma estrutura idêntica e é totalmente elétrico, o que o torna muito menos poluente na sua utilização e não só no seu fabrico.



FIGURA 15 – *LOW FLOOR BUS* DA HANKUK FIBER (FONTE: WWW.BUSWORLD.ORG)

2.6. Painéis sanduiche

A mais-valia do conceito das estruturas em sanduíche é ser uma solução estrutural muito leve, apresentar alta rigidez específica e uma proporção rigidez-peso muito acima do normal. Tipicamente as estruturas em sanduíche são compostas por faces finas, com elevada resistência estrutural, e núcleo espesso de baixa densidade (Campbell, 2004).

A ACS (Airex Composite Structures) aposta na produção de painéis de material compósito para o transporte de passageiros não só na Europa mas em todo o mundo. Os construtores de autocarros inovadores têm normalmente dois objetivos essenciais: construir a preços baixos e maximizar a redução de peso dos veículos. A cadeia de valor da ACS assenta numa construção aligeirada e inteligente, em engenharia sistemática e na integração de sistemas abrangentes, alcançando, com isto, uma estratégia de diferenciação perante a sua concorrência.

3. LCC – Custo do Ciclo de Vida

Genericamente o LCC consiste na análise e somatório de todos os custos de um produto, de um processo ou de uma atividade ao longo da sua vida útil (Real, 2010). As empresas que operam num ambiente de fabrico tecnologicamente avançado descobriram que 90% dos custos do ciclo de vida são determinados pelas decisões que são tomadas previamente no ciclo (Drury, 1998).

Segundo Brown e Yanuck (1985) há quatro fatores principais que podem influenciar a viabilidade ao aplicar a análise do LCC:

1. Intensidade Energética: o LCC deve ser considerado quando se espera que os custos energéticos ao longo da sua vida sejam elevados;
2. Expectativa de vida: para bens com tempo esperado de vida longo, os custos que são adicionados ao preço de compra tornam-se mais importantes. Para bens com curto tempo de vida, os custos iniciais tornam-se um fator mais importante;
3. Eficiência: a eficiência na operação e na manutenção podem ter impactos significativos nos custos globais. O LCC é benéfico quando se conseguem poupanças através dos custos de manutenção;
4. Investimento: regra geral quanto maior o investimento, maior a importância da análise do LCC.

Segundo Dhillon (1947) ao longo dos anos, nunca no setor industrial foi aceite nenhum modelo *standard* de cálculo do custo do ciclo de vida. Ao longo dos anos os modelos de LCC foram classificados de variadas formas. Segundo Sherif e Kolarik (1981) os modelos de LCC eram classificados como conceptuais, analíticos ou heurísticos. Os modelos conceptuais eram até bastante flexíveis mas, com aplicação limitada, por normalmente se basearem em relações hipotéticas de variáveis atribuídas de uma forma qualitativa. Os modelos analíticos baseiam-se em algumas relações matemáticas e as suas subcategorias incluem suporte logístico, comércio e *design* e modelos de custo total. Por fim os modelos heurísticos são “a versão mal estruturada dos modelos analíticos” (Dhillon, 1947).

Existem diversas entradas distintas nos modelos do LCC como o período de cobertura da garantia, os custos de instalação, o tempo médio de reparação, o tempo médio entre avarias, o custo médio de material de uma avaria, o custo do pessoal na ação de manutenção corretiva, etc. (Dhillon, 1947).

Vão apresentar-se dois modelos gerais de LCC

- Modelo geral de LCC 1

$$\text{LCC} = \text{RC} + \text{NRC}$$

EQUAÇÃO 1 – MODELO GERAL DE LCC 1

RC – É o custo recorrente (Recurring cost)

$$\text{RC} = \text{OC} + \text{IC} + \text{SC} + \text{MC} + \text{MTC}$$

EQUAÇÃO 2 – CUSTO RECORRENTE

O custo recorrente neste modelo é obtido através da soma do custo de operação (OC – Operating cost), do custo de inventário (IC – Inventory cost), do custo de apoio (SC – Support cost), do custo com o pessoal (MC – Manpower cost) e ainda do custo de manutenção (MTC – Maintenance cost).

NRC – É o custo não-recorrente (Non-recurring cost)

$$\text{NRC} = C_p + C_i + C_q + C_r + C_t + C_{rm} + C_s$$

EQUAÇÃO 3 – CUSTO NÃO-RECURRENTE

O custo não-recorrente desmultiplica-se nas componentes que se seguem.

C_p – Custo de aquisição (*Procurement cost*)

C_i – Custo de instalação (*Instalation cost*)

C_q – Custo de aprovação de qualificações (*Qualification approval cost*)

C_r – Custo de investigação e desenvolvimento (*Research and development cost*)

C_t – Custo de formação (*Training cost*)

C_{rm} – Custo de desenvolvimento de fiabilidade e manutenção

C_s – Custo de marketing (*Support cost*)

- Modelo geral de LCC 2

$$\text{LCC} = C_p + C_2 + C_3$$

EQUAÇÃO 4 – MODELO GERAL DE LCC 2

Neste modelo os custos dividem-se em três grupos: custo de aquisição (C_p – Procurement cost), custo logístico inicial (C_2 – Initial logistic cost) e no custo recorrente (RC – Recurrent costs).

O custo C_p já foi explicado na equação anterior e, o custo C_2 , refere-se aos custo logístico inicial ou custos de uma só vez, aquando da aquisição do equipamento, como equipamentos de apoio e formação, modificações nos equipamentos de apoio existentes e o custo de gestão de dados técnicos inicial. Relativamente ao custo recorrente as três principais componentes deste são o custo de operação, o custo de gestão e o custo de manutenção.

Na tabela 3 apresentam-se os principais custos de cada uma das fases do veículo (Volpe, 2011)

Elemento de Custo	Considerados neste modelo
Capital	<ul style="list-style-type: none"> - Custo de compra do autocarro - Local para guardar autocarro
Operação	<ul style="list-style-type: none"> - Controlo da frota - Custo de combustível - Custos administrativos
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> - Preventiva - Corretiva - Revisão do ciclo médio

TABELA 3 – ELEMENTOS DE CUSTO CONSIDERADOS NUM MODELO DE LCC (FONTE: VOLPE, 2011)

Estes elementos de custo tornam-se ainda mais interessantes quando associados às respetivas vantagens competitivas que deles advém.

4. Conceitos da Análise de projeto de investimento

A análise deste projeto vai ser de certa forma simplista. Contudo, existem alguns termos necessários a uma análise de um projeto deste tipo como o VAL - Valor Atual Líquido, o VALA - Valor Atual Líquido Ajustado e o payback.

Por conseguinte, o VAL é utilizado para avaliar a viabilidade de um projeto de investimento, calculando o valor atual de todos os *cash flows*. O VAL pode também ser utilizado para medir o valor de qualquer ativo que origine *cash flows* (equipamento, instalações). O *cash flow* futuro esperado deve ser atualizado à data presente e comparado com o valor do investimento atual. Na equação 5 apresenta-se a fórmula matemática de cálculo do VAL.

$$VAL = \sum_{t=0}^n \frac{CFt}{(1 + rc)^t}$$

EQUAÇÃO 5 – FÓRMULA MATEMÁTICA DO VAL (FONTE: LOPES, 2012)

CFt - Cash flow líquido esperado do período t;

n – o nº de períodos que dura o investimento;

t - período de tempo do projeto

rc - taxa de atualização apropriada ao projeto.

O VALA, como se indica na equação 6 tem como primeira parcela de cálculo o VAL base e como segunda parcela o VA_{CFF} os quais se explicam mais a frente.

$$VALA = VAL_{base} + VA_{CFF}$$

EQUAÇÃO 6 – FÓRMULA DE CÁLCULO DO VALA

Para o cálculo do VAL_{base}, é necessário estimar os *cash flows* operacionais do projeto e estimar o custo do capital próprio para uma empresa não endividada com o risco de negócio igual ao projeto em análise (Lopes, 2012). Relativamente à segunda componente da equação, o VA_{CFF} consiste na atualização dos efeitos resultantes do financiamento a taxas apropriadas.

O *payback* de um projeto consiste no tempo que decorre entre o primeiro investimento no projeto e o momento em que o lucro líquido do projeto se iguala a este. À partida, todos os projetos têm um período inicial de maior despesa, ao qual se segue um período de receitas que vêm recuperar o capital investido. O tempo decorrido entre ambos é o período de recuperação. Em suma, o *payback* consiste na divisão da razão entre o custo e o investimento e entre o momento em que é investido o dinheiro e a entrada dos *cashflows* resultantes desse investimento (Equação 7)

$$Payback = \frac{\text{Custo do projeto} / \text{Investimento}}{\text{Entradas em caixa do período}}$$

EQUAÇÃO 7 - FÓRMULA UTILIZADA NO CÁLCULO DO PAYBACK

5. Considerações e trabalho prévio

5.1. Ponto de partida

Utilizou-se como base um estudo prévio de um projeto denominado *FeupBus/Civitas* (Almeida, 2013) em que foi desenvolvido um protótipo respeitando as normas de circulação europeias (Diretiva 2001/85/CE e Regulation UNECE no. 66) obtido por enrolamento filamentar a seco de fibra do tipo E e reforçado com resina de poliéster isoftálica não saturada. Posteriormente, com o objetivo de maximizar os potenciais benefícios da construção em materiais compósitos, utilizou-se o *software* Abaqus/CAE, para efetuar a modelação em elementos finitos bem como para otimizar a carroçaria em questão como se aborda mais à frente.

5.2. Escolha dos materiais

Os materiais selecionados para a estrutura em sanduíche foram a PRFV do tipo E, com resina de poliéster isoftálica não saturada com núcleo em espuma de Policloreto de vinil (PVC). A escolha destes materiais prende-se principalmente com razões económicas. Existia a possibilidade de utilização de resina de epóxico e fibra de carbono mas, as suas propriedades mecânicas vs preço, não mostraram vantagens significativas perante a resina de poliéster e a PRFV do tipo E, como se verifica na figura 16 e 17. Na tabela 4, pode observar-se que a fibra de carbono, apesar de ser, por quilo, onze vezes mais cara do que a PRFV do tipo E, a rigidez específica e a resistência específica são cerca de quatro vezes superiores.

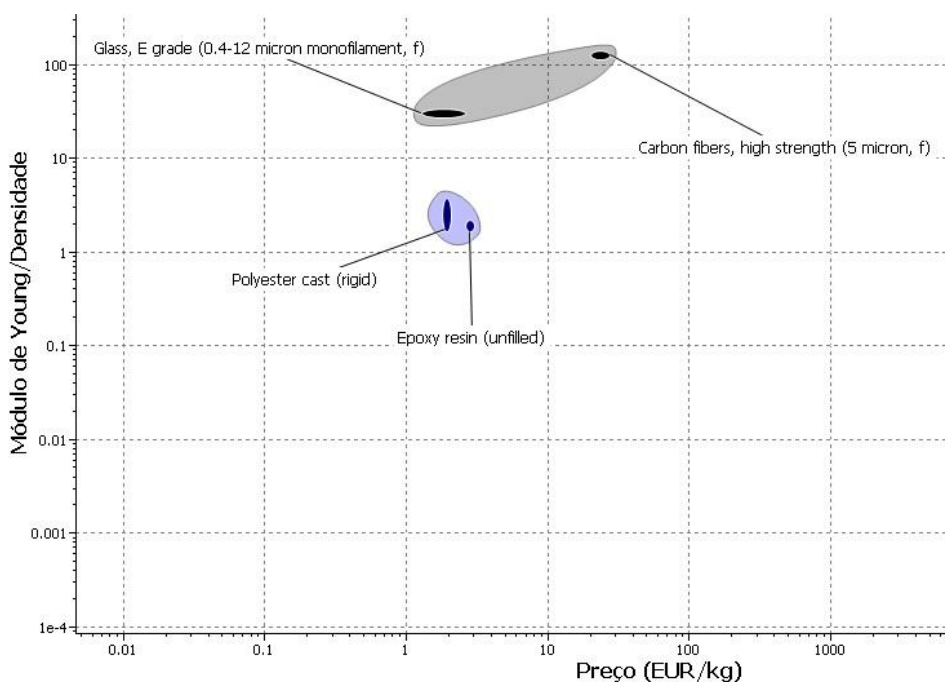


FIGURA 16 – RIGIDEZ ESPECÍFICA (MÓDULO DE YOUNG/DENSIDADE (GPA/KG/M³) VS PREÇO (€/KG)) PARA OS MATERIAIS ANTERIORMENTE INDICADOS (FONTE: CES EDUPACK 2013)

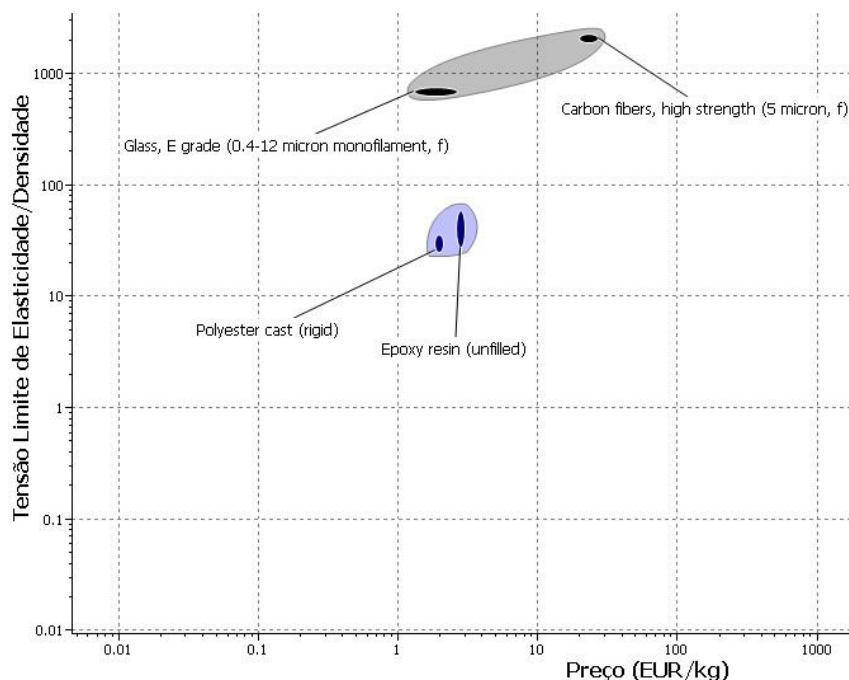


FIGURA 17 - RESISTÊNCIA ESPECÍFICA (TENSÃO LIMITE DE ELASTICIDADE/DENSIDADE (MPA/KG/M³) VS PREÇO (€/KG)) PARA OS MATERIAIS ANTERIORMENTE INDICADOS (FONTE: CES EDUPACK 2013)

	Fibra de carbono	PRFV do tipo E
ρ (kg/m ³)	1800 - 1840	2550 – 2600
E (GPa)	225 - 245	72 – 85
σ_e (MPa)	3750 - 4000	1800 - 1850
Rigidez específica (E/ ρ)	125 - 133	28 – 33
Resistência específica (σ_e / ρ)	2083 - 2173	705 - 712
Preço (€/kg)	20 – 26,7	1,3 – 2,6

TABELA 4 – RIGIDEZ ESPECÍFICA, RESISTÊNCIA ESPECÍFICA E PREÇO DA PRFV DO TIPO E E DA FIBRA DE CARBONO (FONTE: CES EDUPACK 2013)

5.3. Seleção do processo de fabrico

Inicialmente, para um menor impacto ambiental e, para um melhor aproveitamento das sobras no processo produtivo, identificou-se o enrolamento filamentar a seco e posterior impregnação de resina através de VARTM, como sendo a melhor forma de abordar este problema. Este tipo de enrolamento permite utilizar a técnica de *pinch-off* que consiste em seleccionar as zonas que se pretendem impregnar e manter as restantes secas.

No fabrico de uma estrutura de autocarro, esta técnica torna-se especialmente importante, pois não vão ser impregnadas as zonas das janela e das portas, sendo possível o aproveitamento das fibras para posteriores reforços manuais em zonas mais frágeis da

estrutura, uma vez que estas não estão impregnadas com resina. O objetivo será então a produção de uma estrutura em PRFV do tipo sanduíche que, sendo uma peça única, permite uma maior integração de componentes em relação à carroçaria em alumínio reduzindo bastante o tempo de montagem. No entanto, no desenrolar do trabalho houve uma alteração relativamente ao previsto e a técnica de enrolamento filamentar a seco não foi a única opção apresentada.

5.4. Descrição dos modelos existentes

FEUPBUS

Em 2013, foi efetuado um projeto no sentido de melhorar o tipo de construção do CIVITAS denominado FEUPBUS. Para isso, em vez da construção através de molde e posterior colagem, optou-se por fazer a carroçaria toda por enrolamento filamentar a seco e posterior VARTM. Esta alternativa procurou reduzir imenso os tempos de construção da carroçaria, bem como a quantidade de material utilizado, obrigando a que a resina impregnassem os feixes de fibras. Obtém-se, desta forma, uma peça com poucos espaços vazios e alta percentagem de reforço devido à utilização de vácuo. O modelo de base deste estudo foi um Volvo B10M tendo sido projetado para poder circular na via pública sendo obrigado a efetuar a uma série de testes de acordo com o previsto no regulamento europeu “Resistência da superestrutura de veículos grandes para transporte de passageiros”. Este regulamento prevê quatro ensaios distintos (Almeida, 2013):

- Ensaio de capotamento do veículo;
- Ensaio de capotamento de uma secção da carroçaria;
- Ensaio com pêndulo de uma secção da carroçaria;
- Verificação da resistência da superestrutura através de um método de cálculo.

O modelo final da carroçaria nua tem uma massa de 1482,2 kg. É utilizado como matriz a PRFV do tipo E, como reforço a resina de poliéster isoftálica não saturada e como núcleo espuma de PVC - Polyvinyl chloride (Policloreto de vinil). Na tabela 5 apresentam-se as propriedades principais deste laminado (Almeida, 2013)

Tipo de reforço	laminado
Densidade (ρ)	1870 kg/m ³
Espessura de cada camada	0,50 mm
Massa	0,935 kg/m ²

TABELA 5 – PROPRIEDADE DO LAMINADO UTILIZADO NO FEUPBUS (FONTE: ALMEIDA, 2013)

COBUS

Como já foi referido anteriormente o autocarro que foi objeto de estudo, o COBUS 3000, tem uma carroçaria praticamente toda construída em alumínio AL6106-T6 (Anexo E: Ficha técnica), que se apresenta no COBUS na forma de alumínio fundido e de alumínio extrudido.

Este modelo é um autocarro de aeroporto e que, não tem obrigatoriedade de homologação. Assim sendo, o único teste ao qual é sujeito é o teste de travagem. No entanto, a CaetanoBus faz uma série de testes teóricos (simulações) que vão ser mencionados mais a frente na simulação da versão 2 do AEROFEUPBUS.

Na tabela 6 encontram-se algumas informações que nos foram disponibilizadas acerca do COBUS.

Quilómetros/Ano (Quilómetros)	29200
Horas de funcionamento/Ano (horas)	4380
Consumo médio de combustível (gasóleo) (l/100km)	40

TABELA 6 – INFORMAÇÕES DO MODELO COBUS (FONTE: CAETANOBUS)

O COBUS e o AEROFEUPBUS vão ser abordados de forma modular, para simplificar os testes que vão ser efetuados em termos de resistência estrutural (AEROFEUPBUS versão 2). Assim, pode ser feita uma contabilização de peças a mais que o módulo em alumínio tem (necessitam de montagem) relativamente ao módulo equivalente em material composto. Na figura 18 pode observar-se o módulo em questão esquematizado a azul

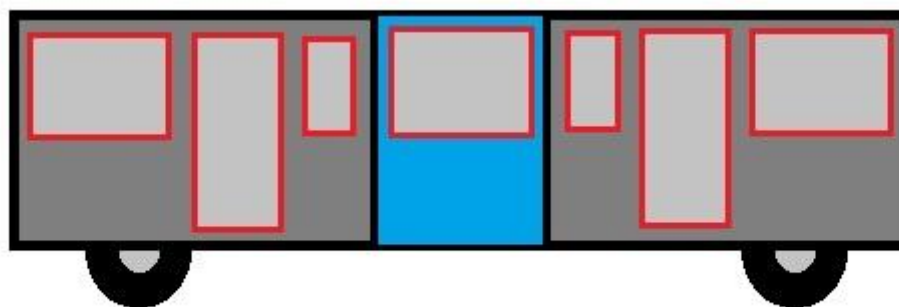


FIGURA 18 – DESENHO SIMPLIFICADO DO MÓDULO CENTRAL ESCOLHIDO PARA O ESTUDO

O módulo em questão tem 1,85 metros de comprimento, 3 metros de largura e 2,5 metros de altura. Esta é a zona da carroçaria de maior reforço e, consequentemente, mais pesada. É também esta zona intermédia do autocarro a que este está sujeita a maior esforço. Na tabela 6 apresenta-se o peso da carroçaria completa e o peso calculado do módulo. A lista de peças que fazem parte do módulo encontra-se no anexo F com a respetiva quantidade. A estrutura do módulo central do COBUS pesa 402,3 kg aproximadamente, não incluindo as janelas. Destes, 284,1 kg correspondem a alumínio 6106 extrudido e 55,1 kg a alumínio 6106 fundido. A massa restante está distribuída por pequenos suportes em aço, parafusos e revestimentos.

5.5. Organização da parte fabril

Na figura 19 apresenta-se o encadeamento das secções pelas quais são submetidos os autocarros na CaetanoBus.



FIGURA 19 – ENCADEAMENTO DE SECÇÕES NA CAETANOBUS

A análise vai focar-se na área das estruturas (secção 26 da linha de montagem da CaetanoBus) uma vez que se considera que manter-se-ão todas as tarefas subsequentes ao posto 2 da secção de estruturas. Na secção das estruturas, as alterações principais (com eliminação e criação de macro tarefas) serão efetuadas nos postos 1 e 2. Na Tabela 7 apresentam-se as macro tarefas a serem realizadas no posto 1 e 2, atualmente com a construção do COBUS através do *kit* de alumínio.

	Nº Trabalhadores	Tarefa	Designação das macro tarefas	Horas MO (Totais)
Posto 1	5	1	Preparação do chassis	4
		2	Aplicação do estrado em aço	9
		3	Pré-montagem e aplicação do estrado em alumínio	14
		4	Pré-montagem dos painéis, traseira e tejadilho em alumínio	22
		5	Preparação das tampas laterais	2
Total de horas Posto 1				51
Posto 2	11	1	Montagem dos painéis laterais, tejadilho e frente em alumínio	68
		2	Montagem da frente em aço	8
		3	Aplicação das tampas laterais	8
		4	Colocação do estribo da porta do motorista	1
Total de horas Posto 2				85

TABELA 7 - DISTRIBUIÇÃO DE TRABALHO NOS DOIS PRIMEIROS POSTOS DA SECÇÃO DAS ESTRUTURAS

O tempo total despendido por cada unidade COBUS na secção das Estruturas é de 329 horas e dessas, 136 estão afetas aos postos 1 e 2.

As vendas do COBUS tiveram o seu pico em 2010 mas, têm sido vendidos nos últimos 5 anos, em média, 126 autocarros por ano. Isto significa que em média é produzido um COBUS a cada dois dias de trabalho. Na tabela 8 apresentam-se as vendas dos últimos 5 anos.

	2009	2010	2011	2012	2013
Nº de COBUS Vendidos	105	154	144	99	126

TABELA 8- VENDAS DE COBUS NOS ÚLTIMOS 5 ANOS

O COBUS é um caso de sucesso comercial pois já leva mais de 3000 unidades vendidas desde que se iniciou o seu fabrico e, segundo a informação disponível, ainda nenhum chegou ao fim do seu ciclo de vida, existindo ainda várias peças de substituição para os primeiros modelos.

6. Projeto realizado

6.1. Módulo AEROFEUPBUS

No estudo do módulo em compósitos, sentiu-se a necessidade de desenvolver uma nova versão. Isto deveu-se ao facto de que a comparação direta entre o COBUS e o AEROFEUPBUS versão 1 era irrealista devido às exigências estruturais serem muito diferentes. Como já foi referido anteriormente, para o estudo da versão 1 do AEROFEUPBUS, baseamos os nossos cálculos de material utilizado, rigidez estrutural e tipo de sanduíche utilizado num estudo prévio de Almeida (2013). Na tabela 9 encontram-se os materiais contabilizados para este módulo da versão 1, respetivas quantidades e pesos de cada constituinte. Estes valores foram calculados através da divisão da quantidade de cada componente pela área total da superfície em m² do FEUPBUS. A partir daí, calculou-se a área da superfície do módulo do AEROFEUPBUS e efetuou-se a multiplicação, chegando-se aos valores apresentados mais à frente.

Material	Quantidade	Unidade
PRFV tipo E	193,072	kg
Resina de poliéster	147,995	kg
Endurecedor	2,219	kg
Espuma PVC	12,794	kg
Desmoldante	1,158	kg
TOTAL	357,238	kg
Filme microp perfurado	33,273	m ²
Fita selante	9,264	m
<i>Peel-ply</i>	33,273	m ²
Tecido de respiro	3,826	m ²
Saco de vácuo	37,058	m ²

TABELA 9 – MATERIAIS PRINCIPAIS UTILIZADOS NO FABRICO DO MÓDULO DO AEROFEUPBUS VERSÃO 1 (QUANTIDADES ADAPTADAS DE ALMEIDA, 2013)

Como se verifica na tabela 9, o peso previsto do módulo da versão 1 do AEROFEUPBUS, situa-se nos 357 kg (359 kg com os insertos de aperto ao chassis), o que significa uma redução em relação ao módulo COBUS equivalente. Na lista de componentes do anexo G pode observar-se o número reduzidos de componentes do AEROFEUPBUS, resultado de uma maior possibilidade de integração de componentes na construção através de material compósito.

6.1.1. Cálculo de resistência estrutural da versão 2

Como já foi referido, durante este projeto, sentiu-se a necessidade de criar uma segunda versão do AEROFEUPBUS, que respondesse aos mesmos critérios de resistência estrutural que o COBUS. A versão 1 estava sobredimensionada para circulação urbana e respeitava as normas de segurança definidas pela UE (União Europeia) em relação aos pesados de passageiros. Como tal, com o auxílio do *software* Abaqus/CAE versão 6.12 efetuaram-se as simulações para a versão 2 do AEROFEUPBUS.

A estrutura foi modelada em elementos finitos como sendo uma casca (porque o comprimento do seu eixo é muitas vezes superior à sua secção transversal) e, para que fosse possível obter uma malha uniforme e com baixo grau de distorção, a malha é formada por elementos quadrangulares e foi efetuada no *software* ANSA (Automatic Net-Generation for Structural Analysis). Utilizou-se o laminado do FEUPBUS, considerando as suas propriedades (tabela 4). Vai-se analisar o comportamento deste módulo da seguinte forma: a ocupação do autocarro máxima é igual ao COBUS (6 passageiros por metro quadrado; simular o efeito de passagem por uma lomba, estando o módulo sujeito a uma aceleração vertical de 3g; é considerado o sistema de ar condicionado, ou seja, existe uma massa de 100 kg adicional no topo do módulo.

O critério de Hashin (1980) foi o método utilizado para avaliar o início da propagação dos danos na estrutura e, tal como no estudo de Almeida (2013), os valores estabelecidos para o início de propagação de danos no módulo são apresentados na tabela 10.

Designação	Valor	Unidade
Tensão de cedência à tração na direção longitudinal	500	MPa
Tensão de cedência à compressão na direção longitudinal	700	MPa
Tensão de cedência à tração na direção transversal	30	MPa
Tensão de cedência à compressão na direção transversal	100	MPa
Tensão de corte limite para a provocação de dano	40	MPa

TABELA 10 – VALORES DE INÍCIO DE PROPAGAÇÃO DE DANO DO MÓDULO AEROFEUPBUS (FONTE: ALMEIDA, 2013)

A versão 2 do AEROFEUPBUS é constituída por um laminado composto pelo reforço (PRFV do tipo E), pela matriz (resina de poliéster não saturada) e pelo núcleo de 30 mm de espessura (espuma PVC). O painel sanduíche é então formado por 10 camadas (5 camadas + núcleo + 5 camadas) de PRFV do tipo E orientadas de forma a formarem um ângulo de +/- 70° com o eixo do mandril, com o núcleo em PVC de 30 mm. Na figura 20 mostra-se a aceleração a que o módulo está sujeito.

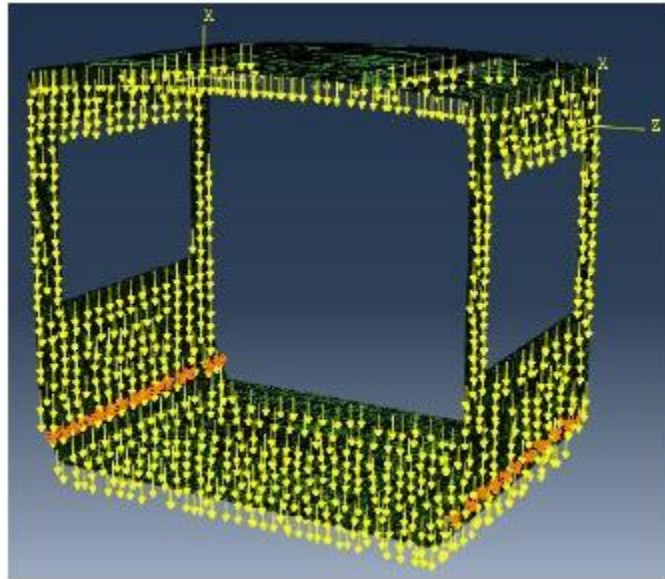


FIGURA 20 – REPRESENTAÇÃO DOS APOIOS E DA ACELERAÇÃO AOS QUAIS O MÓDULO ESTÁ SUJEITO

6.1.2. Propagação de dano na versão 2

As simulações foram realizadas recorrendo ao *software* Abaqus/CAE versão 6.12 como referenciado anteriormente. Nas primeiras simulações da propagação de dano das fibras à compressão, das fibras à tração, da matriz à compressão e da matriz à tração, obteve-se um módulo com 189 kg mas, os valores de propagação de dano, eram superiores a “1” (o valor “1” corresponde ao início de propagação de dano). Como tal, e porque a propagação de dano se deu numa zona localizada, incluiu-se um reforço de laminado idêntico ao da carroçaria, com 1 mm de espessura, tanto no interior da carroçaria em sanduíche como no exterior da mesma. A figura 21 representa os resultados obtidos para o início da propagação de dano na matriz à tração sujeita a uma aceleração vertical de 3 g, com inclusão dos reforços, obtendo-se um módulo com 198 kg, sendo este então o AEROFEUPBUS versão 2.

No entanto, o COBUS é submetido a mais dois testes. Estes dois testes simulam uma travagem brusca (aceleração de 0,75 g longitudinal) e uma situação curva apertada (aceleração de 1,25 g lateral). O AEROFEUPBUS versão 2 foi sujeito a estes mesmos testes teóricos, apresentando-se a tabela 11 com todos os resultados resumidos. Todas as restantes figuras representativas dos diferentes testes de início de propagação de dano estão no anexo H.

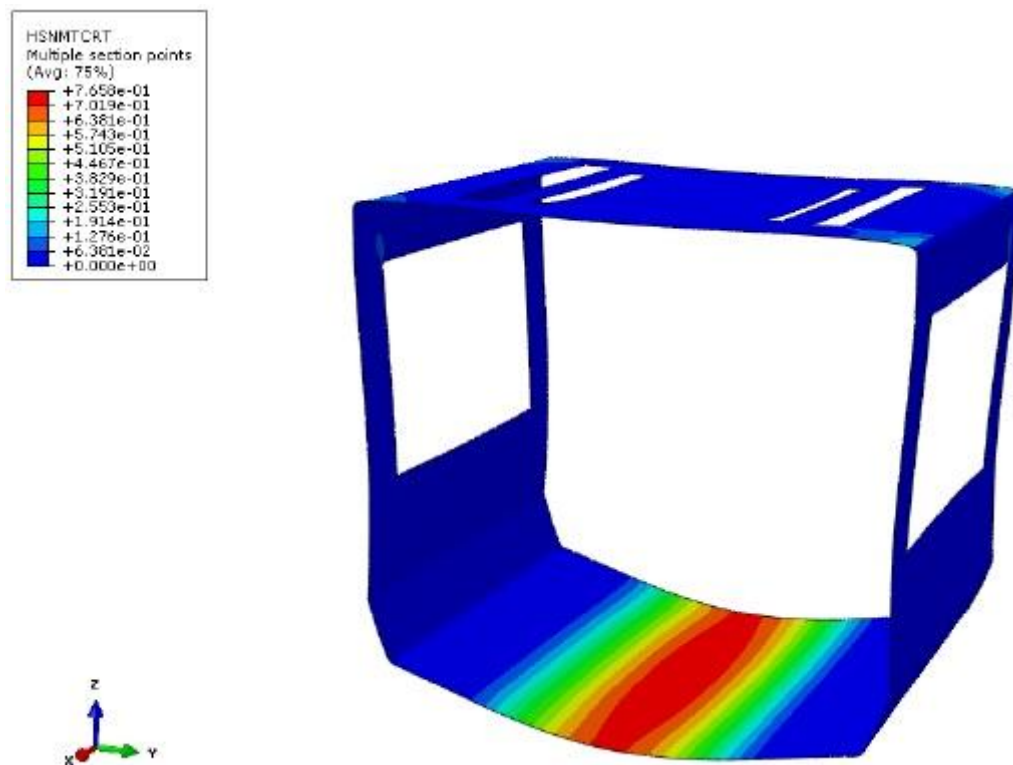


FIGURA 21 – IMAGEM REPRESENTATIVA DO INÍCIO DE PROPAGAÇÃO DO DANO DA MATRIZ À TRAÇÃO PARA O MÓDULO AEROFEUPBUS VERSÃO 2 (COM REFORÇO), SUJEITO A UMA ACELERAÇÃO VERTICAL DE 3 G

Inclusão de reforço	Solicitação	(FFC) Falha de fibras à compressão	(FFT) Falha de fibras à tração	(FMC) Falha de matriz à compressão	(FMT) Falha de matriz à tração
Não	Vertical de 3 g	0,02	0,04	2,16	2,36
Sim	Vertical de 3 g	0,02	0,02	0,76	0,91
	Lateral de 1,25 g	0,009	0,0004	0,02	0,009
	Longitudinal de 0,75 g	0,02	0,01	0,95	0,77

TABELA 11 – VALORES MÁXIMOS OBTIDOS PELO *SOFTWARE* DE SIMULAÇÃO ABAQUS/CAE 6.12 PARA A PROPAGAÇÃO DE DANO DE HASHIN (1980) NO AEROFEUPBUS VERSÃO 2

6.1.3. Execução técnica do fabrico

Nesta secção vai descrever-se brevemente o processo de fabrico, desde o seu enrolamento até ao corte dos materiais em excesso.

O processo inicia-se com o aperto do mandril à máquina de enrolamento filamentar e posterior selagem de quaisquer fugas que possam existir. De seguida inicia-se a aplicação de um agente desmoldante no mandril que vai facilitar a posterior remoção da peça, quando acabada, do mandril. Para evitar o escorregamento das fibras durante o enrolamento e mantendo a qualidade de acabamento da superfície interna da peça, aplica-se filme à volta de

todo o mandril e, para se dar início ao processo fixam-se as pontas dos *rovings*¹ de PRFV ao mandril e inicia-se o enrolamento da primeira camada de PRFV mantendo sempre a tensão das fibras.

Sendo uma estrutura em sanduíche, como já foi referido, vai enrolar-se a primeira camada de PRFV e, terminando o primeiro enrolamento, o núcleo em PVC vai ser colado à primeira camada por intermédio de um *spray* adesivo. De seguida inicia-se o enrolamento da segunda camada, colando novamente as pontas dos *rovings* de PRFV por intermédio de fita adesiva ao núcleo, e efetuando o enrolamento das camadas pretendidas.

A fase seguinte diz respeito à técnica de *pinch-off*. Esta técnica, como já foi referido, consiste em reduzir a permeabilidade das fibras nas zonas destinadas a portas e janelas, apertando a pré-forma ao mandril por intermédio de parafusos e mantendo as fibras secas, permitindo assim a sua reutilização. Posteriormente cola-se a *peel-ply* por fora do enrolamento, sobrepondo-a com o filme micro-perfurado (que absorve a resina em excesso). Em último lugar é colocado um tecido de respiro entre o contramolde e o saco de vácuo para que este não se danifique. O saco de vácuo deve ser bem vedado para que todas as fibras fiquem bem impregnadas pela resina. Após estes passos, efetua-se a infusão de resina recorrendo à ajuda do vácuo (VARTM) e aguarda-se a sua cura.

Para libertar o mandril é retirado o saco de vácuo, o filme micro-perfurado, o *peel-ply* e os contramoldes das portas e janelas e procede-se ao corte das fibras que não foram impregnadas. Depois disto é feita a recolha do mandril que depois de devidamente limpo, encontra-se pronto para outro enrolamento.

6.2. Reorganização da linha de montagem

A produção deste tipo de carroçaria por enrolamento filamentar é totalmente inovadora, o que obriga a algumas preocupações na implementação deste novo processo construtivo na secção de estruturas (secção 26). Este novo processo vai implicar a utilização de adesivos estruturais na montagem desta estrutura no chassis e a formação adequada para os funcionários afetos a estes postos.

A receção de uma carroçaria destas dimensões nas estruturas faz com que seja necessária, além da reorganização do espaço, uma forma de transportar as carroçarias de cima do camião que as transporta para dentro da secção das estruturas para realizar a montagem no chassis. Desta forma, a linha 2, paralela à linha de montagem, que atualmente é utilizada para a montagem do estrado em alumínio e do tejadilho, tornar-se-á o local ideal para rececionar esta estrutura em compósito. A descarga do camião será feita pela grua atualmente existente na CaetanoBus, que é atualmente utilizada para transportar o estrado e o tejadilho em alumínio depois de pré montados para a linha 1 da secção das estruturas.

Considera-se também que a estrutura em compósitos vem com dois tubos retangulares em aço, apertados nos insertos de fixação da carroçaria ao chassis, que saem fora da estrutura cerca de 15 cm de cada lado, que permitam o acoplamento de um cavalete para esta ser retirado pela grua, dentro da secção das estruturas. Estes tubos são reutilizáveis nas carroçarias posteriormente fabricadas pelo fornecedor.

¹ *Rovings* – Filamentos enrolados em forma de bobina.

A reorganização das macro tarefas vai ser elaborada de acordo com a tabela 12. Relativamente à tabela 6 vão ser eliminadas três tarefas no posto 1, duas no posto 2 e vai ser introduzida uma nova tarefa no posto 1, que corresponde à montagem da carroçaria em sistemas compósitos no chassis, tarefa à qual corresponderá um tempo de cinco horas. Assume-se que a empresa que fabrica a carroçaria em PRFV vai enviar esta já com os cortes para as portas, janelas, cavas de rodas e preparada para a sua montagem no chassis de aço.

	Tarefa	Designação das macro tarefas	AEROFEUPBUS Horas MO	COBUS Horas MO	Δ Horas MO
Posto 1	1	Preparação do chassis	4	-	-
	2	Aplicação do estrado em aço	9		
	3	Montagem da carroçaria em compósito no chassis	5		
Total horas posto 1			18	51	$\Delta = 33$
Posto 2	1	Montagem da frente em aço	8	-	-
	2	Colocação do estribo da porta do motorista	1		
Total horas posto 2			9	85	$\Delta = 76$

TABELA 12 – NOVA DISTRIBUIÇÃO DO TRABALHO NOS DOIS PRIMEIROS POSTOS DA SECÇÃO DAS ESTRUTURAS

6.3. Acabamento da carroçaria

Este ponto é uma das desvantagens do AEROFEUPBUS. O acabamento interior é perfeito mas, o exterior, padece de imperfeições relacionadas com a própria técnica de enrolamento filamentar, que necessitam de trabalho extra. Para providenciar o acabamento desejado definiu-se que as novas carroçarias do AEROFEUPBUS (ambas as versões) necessitariam de um trabalho extra de 10 horas na secção da pintura, para dar massa de poliéster e posterior lixagem e para efetuar o "trimming" das arestas e das zonas de ligação, não alterando no entanto os postos ali existentes nem a linha de trabalho.

6.4. Previsão de vendas do COBUS

Numa análise comparativa de um projeto desta natureza, importa indicar quais são as previsões de vendas do COBUS, atualmente, no período de 5 anos considerado. Existe um otimismo por parte da CaetanoBus e, a subida das vendas, é uma meta a curto prazo. Isto implica que a Caetano consiga produzir mais e melhor. A redução de mão-de-obra em qualquer processo é sempre vista pela CaetanoBus como um fator positivo desde que, os custos implicados estejam de acordo com as possibilidades e que a qualidade do produto se

mantenha. Na figura 22 está representada a previsão de vendas das unidades COBUS para o período considerado.

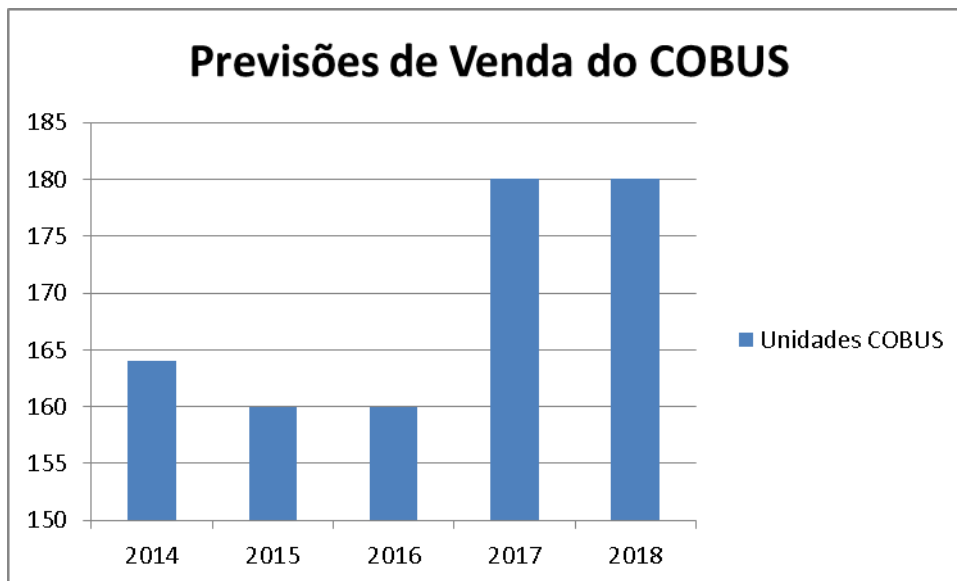


FIGURA 22 – PREVISÕES DE VENDA DO COBUS PARA OS PRÓXIMOS 5 ANOS (FONTE: CAETANOBUS)

Para atingir estas metas a CaetanoBus prevê uma melhoria contínua dos processos produtivos e, uma maior integração de componentes como no caso do AEROFEUPBUS, é vista com bons olhos.

6.5. Poupança associada à redução de mão-de-obra

A mão-de-obra na construção de um autocarro é uma fatia grande no seu custo. A produção da carroçaria do COBUS através da técnica de enrolamento filamentar permite uma maior integração de componentes e, com isto, uma redução no tempo total de mão-de-obra necessária à produção do mesmo. Na tabela 13 encontram-se as horas de mão-de-obra necessárias atualmente para a montagem do COBUS e a respetiva diminuição na construção do AEROFEUPBUS. A diminuição de mão-de-obra vai ser grande mas, ao longo dos 5 anos de estudo, vai introduzir-se uma redução gradual nas horas necessárias à montagem, devido ao aperfeiçoamento da técnica e não devido à alteração da carroçaria (como no 1º ano). Assim sendo, vai considerar-se uma redução de 100 horas de mão-de-obra no primeiro ano e, para os seguintes, uma redução gradual anual de 2 horas de mão-de-obra por autocarro. Para o cálculo das 100 horas de redução iniciais contabilizaram-se as cerca de 110 horas de redução nos dois primeiros postos das estruturas e o aumento de 10 horas na secção da pintura.

Ano →	2014	2015	2016	2017	2018	Total
↓ Modelo	164	160	160	180	180	844 autocarros
COBUS	127100	124000	124000	139500	139500	654100 horas
AEROFEUPBUS	110700	107680	107360	120420	120060	566220 horas
Δ – Variação (horas)	-16400	-16320	-16640	-19080	-19440	-87880 horas

TABELA 13 – REDUÇÃO DE HORAS NO FABRICO DO MODELO AEROFEUPBUS EM RELAÇÃO AO COBUS

A redução apresentada ganha maior significado quando se verifica a quantidade de AEROFEUPBUS que conseguem ser produzidas durante o mesmo período de tempo, quando comparado com o COBUS. Na tabela 14 faz-se essa comparação.

Ano →	2014	2015	2016	2017	2018	Total
COBUS	164	160	160	180	180	844 autocarros
AEROFEUPBUS	188	184	185	208	209	975 autocarros
Δ – Variação (autocarros)	+24	+24	+25	+28	+29	+131 autocarros

TABELA 14 – AUMENTO DE AUTOCARROS PRODUZIDOS DO MODELO AEROFEUPBUS EM RELAÇÃO AO COBUS EM FUNÇÃO DO Nº DE HORAS DE MÃO-DE-OBRA DISPONÍVEIS

6.6. Comparação de custo entre COBUS e AEROFEUPBUS

Pretende-se nesta fase fazer uma comparação de custo, que permita uma posterior avaliação mais detalhada deste possível investimento.

Foram contactadas as duas empresas do norte (empresa A e B), que poderiam ter a capacidade e o equipamento necessários para produzir estas carroçarias através de enrolamento filamentar, no sentido de obter preços tanto para carroçarias (versão 1 e 2), como para o mandril utilizado no seu fabrico. A empresa A apresentou uma proposta para uma carroçaria obtida por enrolamento filamentar a seco, com posterior impregnação de resina através de VARTM, conforme apresentado anteriormente. A empresa B mostrou-se incapaz de produzir algo desta natureza (processo de VARTM pouco desenvolvido) a curto prazo, pelo que optou por apresentar o orçamento para produção de uma carroçaria idêntica através de enrolamento filamentar húmido. Na tabela 15 encontra-se a composição resumida das carroçarias e respetivo peso e na tabela 16 os valores de venda que foram propostos por ambas as empresas.

Modelo	Constituição	Peso estimado
COBUS	Alumínio extrudido	1650 kg
AEROFEUPBUS versão 1	Sanduiche (4mm PRFV + 42mm PVC + 4mm PRFV)	1465 kg
AEROFEUPBUS versão 2	Sanduiche (2,5mm PRFV + 30mm PVC + 2,5mm PRFV)	820 kg

TABELA 15 – PESO E COMPOSIÇÃO RESUMIDA DOS DIFERENTES MODELOS DE CARROÇARIA

Empresa	Modelo	Processo de fabrico	Custo da carroçaria	Custo do mandril
COBUS	COBUS	Extrusão de alumínio	19780 €	-
A	AEROFEUPBUS versão 1	Enrolamento filamentar a seco	97.500 €	150.00 0€
	AEROFEUPBUS versão 2	Enrolamento filamentar a seco		150.000 €
B	AEROFEUPBUS versão 1	Enrolamento filamentar húmido	19.950 €	30.000 €
	AEROFEUPBUS versão 2	Enrolamento filamentar húmido	15.150 €	30.000 €

TABELA 16 – CUSTO ATUAL DA CARROÇARIA COBUS E ORÇAMENTO DA EMPRESA A E B PARA VENDA DE CADA CARROÇARIA EM COMPÓSITO E O RESPECTIVO MANDRIL

Como se pode verificar existe uma redução significativa de peso da carroçaria em compósitos. A versão 1 do AEROFEUPBUS conseguiu uma redução de cerca de 11% em relação ao original e, a versão 2 conseguiu uma redução de mais de 50%.

Isto é um ponto muito positivo para a CaetanoBus, pois a versão 2 do AEROFEUPBUS vai traduzir-se numa redução de peso efetiva em relação ao COBUS original em vazio de 7,5%.

O cálculo da redução do custo de mão-de-obra da CaetanoBus divide-se em várias componentes distintas. O valor atribuído à hora de trabalho de cada funcionário fabril são 25€. As amortizações e depreciações da empresa dizem respeito a 50% deste valor, enquanto os restantes 50% são repartidos pelo ordenado do trabalhador, pela formação necessária ao seu bom desempenho e pelos gastos gerais de fabrico (GGF). Uma vez que reduzindo o tempo de mão-de-obra em cada autocarro os custos com depreciações amortizações se mantêm, considera-se que a empresa, ao produzir o AEROFEUPBUS, vai poupar em mão-de-obra 50% do valor de cada hora de trabalho a menos. Esta informação resume-se na tabela 17.

Modelo	Parcela de custo	Horas de mão-de-obra consideradas	Valor
COBUS	Amortizações e depreciações (50%)	775	9687,5 €
	Custo trabalhador e GGF (50%)	775	9687,5 €
AEROFEUPBUS	Amortizações e depreciações (50%)	775	9687,5 €
	Custo trabalhador e GGF (50%)	675	8437,5 €
Δ – Variação			- 1250 €

TABELA 17 – VARIAÇÃO DE CUSTO DE MÃO-DE-OBRA NA MONTAGEM DO COBUS vs AEROFEUPBUS

Relativamente à carroçaria obtida por enrolamento filamentar o custo de cada carroçaria vai variar conforme a escolha. Vão ser comparadas as diferentes alternativas e os diferentes fornecedores para criar uma visão abrangente de todas as opções possíveis. Apesar de ser um processo que permite mais aproveitamento de matéria-prima, o enrolamento filamentar a seco tem um custo demasiado elevado. Na figura 23 faz-se a comparação do custo das diferentes alternativas incluindo a mão-de-obra necessária à montagem das mesmas.

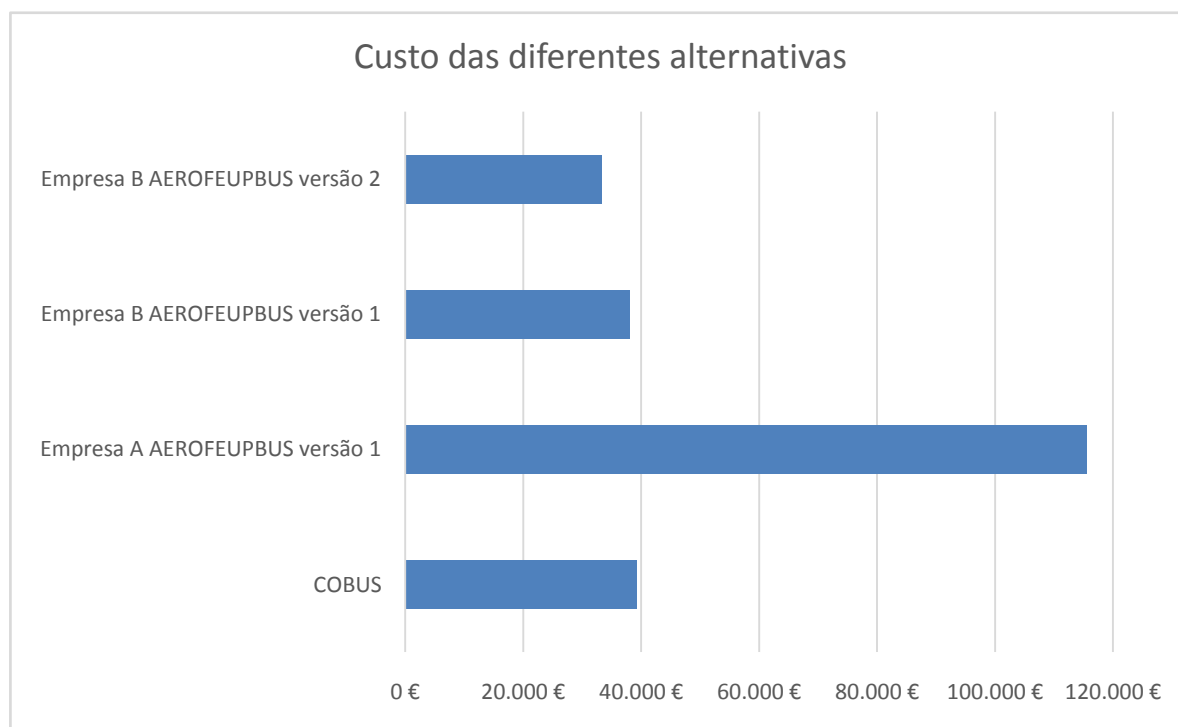


FIGURA 23 – GRÁFICO REPRESENTATIVO DO CUSTO DE UMA CARROÇARIA DAS DIFERENTES ALTERNATIVAS PARA A CAETANOBUS

Pode então afirmar-se que, numa primeira aproximação ao problema, a solução que parece mais vantajosa em termos económicos e de exequibilidade, do ponto de vista direto de custos será a alternativa da versão 2 do AEROFEUPBUS que foi proposta pela empresa B.

7. Análise do projeto de investimento

A análise deste projeto de investimento vai ser feita a curto prazo (5 anos) e espera-se que daqui se consigam tirar as ilações necessárias à tomada de decisão. Baseamos os nossos cálculos na proposta da empresa B que mostrou ser a mais aceitável do ponto de vista económico.

O investimento deve ser feito com a certeza que o seu *payback* é tão reduzido quanto possível. Neste contexto, serão apresentados os objetos onde vai ser investido o capital, o seu custo estimado em valores não atualizados temporalmente e depois a sua depreciação findos os 5 anos do projeto. No fim, pretende-se indicar a informação relativa às necessidades de financiamento e o *payback* esperado deste investimento. No primeiro ano existe o investimento a fazer na compra do mandril, dos cavaletes de descarga a serem utilizados na CaetanoBus, nos tubos retangulares que vêm apertados aos insertos para facilitar a descarga e no portão que será introduzido na secção 26 (estruturas) mas na linha 2 (atualmente linha auxiliar de montagem de alguns componentes). Todos os anos os cavaletes, o portão e o mandril vão necessitar de manutenção, estando esses custos contabilizados na tabela 18. Vai ainda ser contabilizada a depreciação destes objetos de investimento, sendo considerado para o mandril e para o portão que vai ser aplicado um tempo de vida esperado de 10 anos. Para os restantes vão considerar-se apenas 5 anos.

Objeto de investimento	2014	2015	2016	2017	2018	Total
Mandril	30000	400	400	400	400	31600
4 Cavaletes de descarga do autocarro	4000	100	100	100	100	4400
12 Tubos retangulares para cavaletes	1500	0	0	0	0	1500
Aplicação de portão na linha 2 da secção 26	3500	200	200	200	200	4300
Valor total	39000	700	700	700	700	41800 €

TABELA 18 – CUSTOS RELACIONADOS COM O INVESTIMENTO (*CASH FLOW* DE INVESTIMENTO)

A poupança efetiva do AEROFEUPBUS em relação ao COBUS apresenta-se na tabela 19. Como se pode observar, a versão 2 do AEROFEUPBUS apresenta uma poupança total, ao longo dos 5 anos do projeto, de mais de 5 milhões de euros.

Poupança relativamente ao COBUS	2014	2015	2016	2017	2018	Total
Mão-de-obra	205000	200000	200000	225000	225000	
AEROFEUPBUS versão 1	-27880	-27200	-27200	-30600	-30600	-143480
AEROFEUPBUS versão 2	759320	740800	740800	833400	833400	3907720
Δ versão 1	177120	176800	180800	207900	212400	955.020 €
Δ versão 2	964320	944800	948800	1071900	1076400	5.006.220 €

TABELA 19 – POUPANÇA ESTIMADA NA CONSTRUÇÃO DO AEROFEUPBUS (*CASH FLOW* DE EXPLORAÇÃO)

Na tabela 20 encontra-se calculado o valor atualizado do *cash flow* de financiamento (VA_{CFF}) utilizado no calculo do VALA. Estes valores foram atualizados à taxa anual de 7%.

Rubrica	C_0	C_1
Empréstimo	40000	-
Reembolsos	-	-40000
Encargos Financeiros (EF)	-	-1777
Economia de imposto de EF	-	444
Total Cash Flow Financiamento	40000	-41333
VA_{CFF} (7%)	1371,03 €	-

TABELA 20 - *CASH FLOW* DE FINANCIAMENTO E CÁLCULO DO VA_{CFF}

Os *cash flows* operacionais relativos à versão 2 do AEROFEUPBUS apresentam-se na tabela 21. Considera-se um imposto de 25% sobre o rendimento e considera-se que o custo do capital próprio real da CaetanoBus é de 18,55%. Uma vez que não existia informação acerca da CaetanoBus este valor foi calculado através da média de todo o setor automóvel na europa fornecido por *Damodoran Online* (Damodoran, 2014).

Considera-se que o valor contabilístico no fim do projeto é o mesmo valor pelo qual se vendem os ativos que depreciam a 10 anos, o que significa que não existem mais valias. Na equação 8 está indicada a formula de calculo do valor contabilístico no fim do projeto.

$$\text{Valor Contabilístico} = \text{Valor de Aquisição} - \text{Depreciações acumuladas}$$

EQUAÇÃO 8 - FÓRMULA DE CÁLCULO UTILIZADA PARA O VALOR CONTABILÍSTICO

Escreva uma equação aqui.

Rubrica	2014	2015	2016	2017	2018
Poupanças	964320	940800	940800	1058400	1058400
Mão-de-obra	205000	200000	200000	225000	225000
Compra das carroçarias	759320	740800	740800	833400	833400
Gastos	39000	700	700	700	700
Materiais	39000	700	700	700	700
Depreciações	4450	4450	4450	4450	4450
Resultado Antes de Impostos	920870	935650	935650	1053250	1053250
Imposto (25%)	230217,5	233912,5	233912,5	263312,5	263312,5
Resultado Liquido	690652,5	701737,5	701737,5	789937,5	789937,5
Cash flows operacionais	656102,5	705487,5	705487,5	793687,5	810437,5
Investimento total	39000	700	700	700	700
Valor Residual	-	-	-	-	16750
Cash flows atualizados	656102,5 €	595097 €	501979,76 €	476370,51 €	410311,13 €
VAL_{base}	2.639.860,90 €				

TABELA 21 - CASH FLOWS OPERACIONAIS ATUALIZADOS RELATIVOS À VERSÃO 2 DO AEROFEUPBUS E VAL_{BASE}

Conforme indicado na equação 6 o valor do VALA, com o *cash flow* operacional atualizado à taxa de 18,55% e o *cash flow* de financiamento atualizado à taxa de 7% é o seguinte:

$$\text{VALA} = € 2.639.860,90 + € 1.371,03 = € 2.641.231,93$$

A determinação do *payback* do investimento foi calculada somando o valor total dos investimentos com o custo do financiamento necessário e dividindo este pelos 365 dias de um ano. Os resultados obtidos na figura 24 mostram que este projeto tem um *payback* muito reduzido, independentemente da versão escolhida para produção.

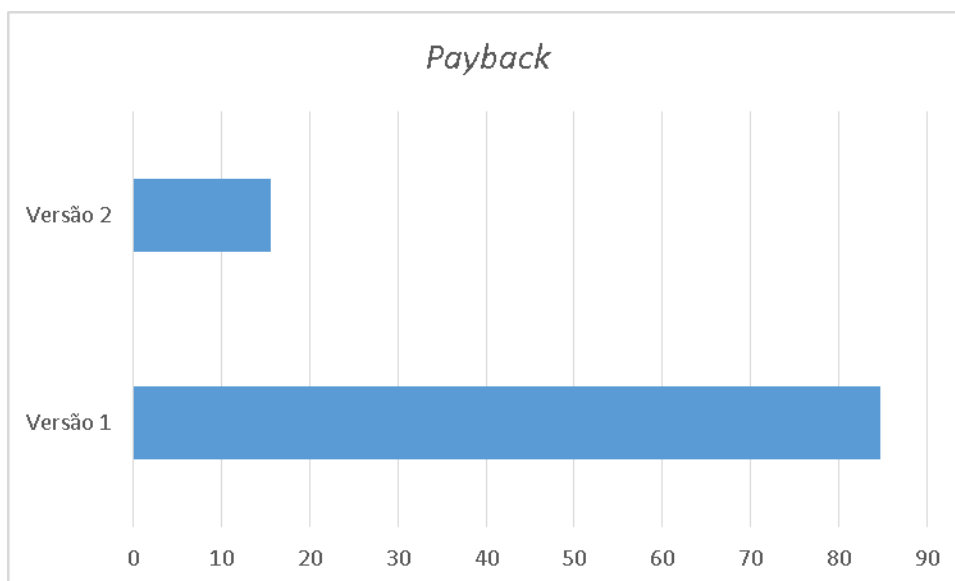


FIGURA 24 – NÚMERO DE DIAS NECESSÁRIOS AO *PAYBACK* DO INVESTIMENTO

Está previsto pedir um financiamento de 40 000 € e, dado o *payback* reduzido do projeto, este ser pago num ano, com um juro mensal de 0,6 % e em 12 prestações constantes. Para o cálculo da prestação constante utilizou-se a equação 9 como se mostra mais à frente. Vai ser apresentado na tabela 22 o plano de pagamento do financiamento previsto.

$$CD = P \times An|r$$

EQUAÇÃO 9 – EQUAÇÃO PARA CÁLCULO DE PRESTAÇÕES CONSTANTES

CD – Capital em dívida

P – Valor da prestação

n – número de prestações

r – taxa de juro

$An|r$ - Fator de amortização

# Prestação	Capital em dívida no início do período	Juro contido na prestação	Prestação	Amortização de capital	Capital em dívida no final do período	Benefício fiscal associado ao juro
1	40.000 €	240 €	3.481 €	3.241 €	36.759 €	60 €
2	37.892 €	227 €	3.481 €	3.254 €	34.638 €	57 €
3	35.616 €	214 €	3.481 €	3.268 €	32.348 €	53 €
4	33.157 €	199 €	3.481 €	3.282 €	29.875 €	50 €
5	30.502 €	183 €	3.481 €	3.298 €	27.204 €	46 €
6	27.634 €	166 €	3.481 €	3.316 €	24.318 €	41 €
7	24.537 €	147 €	3.481 €	3.334 €	21.203 €	37 €
8	21.193 €	127 €	3.481 €	3.354 €	17.839 €	32 €
9	17.580 €	105 €	3.481 €	3.376 €	14.204 €	26 €
10	13.679 €	82 €	3.481 €	3.399 €	10.280 €	21 €
11	9.465 €	57 €	3.481 €	3.425 €	6.040 €	14 €
12	4.915 €	29 €	3.481 €	3.452 €	1.463 €	7 €
		1.777 €	Total	40.000 €		444 €

TABELA 22 – PLANO DE PAGAMENTO DO FINANCIAMENTO

Todo o estudo relativo à análise deste projeto de investimento mostra viabilidade para o mesmo sendo que, há considerações que são feitas que podem não ser completamente acertivas.

8. Vantagens competitivas do AEROFEUPBUS e LCC

O AEROFEUPBUS, enquanto autocarro de aeroporto, consegue reunir nas suas características pontos mais apelativos do que o COBUS, que é um caso de sucesso mundial. Muitos dos pontos positivos vistos pelo cliente, deste tipo de estrutura, são vantagens competitivas em relação à concorrência direta. Vai ser efetuado um pequeno estudo comparativo do LCC, do ponto de vista do cliente, do COBUS, com o AEROFEUPBUS versão 2.

Vai considerar-se que o preço de venda do AEROFEUPBUS se vai manter igual ao do COBUS e assim sendo, o elemento de custo que vai sofrer alteração será o consumo de combustível. Para fazer um cálculo aproximado da redução de consumo de combustível do AEROFEUPBUS relativamente ao COBUS vai recorrer-se a um estudo de Subic e Schiavone (2006) onde é feita uma estimativa de redução de consumo de combustível de um veículo que reduza o seu peso original. Utilizou-se a equação 8 (Fonte: Subic e Schiavone (2006)) e obtiveram-se os valores da tabela 21.

$$C_{\text{Ref. com}} / C_{\text{Ref. veh.}} = c * M_{\text{Ref. com}} / M_{\text{Ref. veh.}}$$

EQUAÇÃO 10 – CÁLCULO DE REDUÇÃO DE COMBUSTÍVEL DO AEROFEUPBUS VERSÃO 2 EM RELAÇÃO AO COBUS

$C_{\text{Ref. com}}$ – Consumo de combustível do AEROFEUPBUS (l/100km);

$C_{\text{Ref. veh.}}$ – Consumo de combustível do veículo de referência (COBUS) (l/100km);

$M_{\text{Ref. com}}$ – Massa do AEROFEUPBUS (Kg);

$M_{\text{Ref. veh.}}$ – Massa do veículo de referência (COBUS) (Kg);

c – taxa adimensional que representa a divisão do CC (coeficiente de consumo) pelo CW (coeficiente de peso);

O valor utilizado como consumo de combustível do veículo de referência foi o indicado na tabela 5 (40 l/100km), a massa do veículo de referência foram os 12.000 kg, que correspondem ao peso do COBUS e, a massa do AEROFEUPBUS considerada, foi a estimada para a versão 2, que são 11.170 kg. Posteriormente, calculou-se o coeficiente c , igualando este à razão entre a percentagem de redução de peso total anteriormente calculada (7,5%) e estimativa de redução nos consumos teórica de 7%. Com isto, obtivemos um consumo para o AEROFEUPBUS versão 2 de cerca de 35 l/100km. Considerou-se que o custo com o combustível num aeroporto é mais baixo, fixando-se esse valor em 1,20 €/l. Na tabela 23 apresenta-se a poupança anual esperada por cada AEROFEUPBUS em circulação.

Modelo	Consumo	Kms/ano	Custo combustível
COBUS	40 l/100km	29.200km	1.401.600€
AEROFEUPBUS versão 2	35 l/100km	29.200km	1.226.400€
Poupança anual			175.200 €

TABELA 23 – POUPANÇA ANUAL DE COMBUSTÍVEL DO AEROFEUPBUS VERSÃO 2 EM RELAÇÃO AO COBUS

Posto isto, a CaetanoBus, se optar pela construção do AEROFEUPBUS, vai conseguir uma série de vantagens em relação à sua concorrência direta no mercado dos autocarros para aeroporto. Vai ser uma empresa mais responsável socialmente, reduzindo as emissões de gases poluentes para a atmosfera, vai reduzir o custo de fabrico destes autocarros, aumentando a margem de lucro, conseguirá certamente manter a imagem no mercado dos autocarros como uma empresa de vanguarda que aposta na inovação constante, reduzirá os tempos de entrega, pode garantir ao cliente uma redução do consumo graças à diminuição do peso do conjunto e por fim, mas não menos importante, conseguirá reduzir a utilização do ar condicionado e melhorar a acústica interna dos autocarros, graças à solução de construção do tipo sanduíche.

Utilizando o modelo proposto por Volpe (2011) vai fazer-se um estudo comparativo do LCC entre o COBUS e o AEROFEUPBUS versão 2 para um lote de dez autocarros ao longo de dez anos. Na tabela 24 apresentam-se os valores comparativos de LCC.

Elemento de custo		COBUS	AEROFEUPBUS Versão 2
Capital	Custo de compra do autocarro	€197.500	€152.500
	Local para guardar autocarro	-	-
Operação	Controlo da frota	-	-
	Custo do combustível	€14.016.000	€12.264.000
	Custos administrativos	-	-
Manutenção	Preventiva	↑	↓
	Corretiva	↑	↓
	Revisão do ciclo médio	↑	↓
Total quantificável		14.213.500 €	12.416.500 €
Δ - Variação		1.797.000 €	

TABELA 24 - VALORES COMPARATIVOS DE LCC ENTRE O COBUS E O AEROFEUPBUS VERSÃO 2

Como se pode verificar, uma frota de dez autocarros, anualmente atinge uma poupança de mais de 1,7 milhões de euros, o que é um argumento de venda irrefutável e muito valioso. Quanto à manutenção, embora não tenha sido possível calcular o benefício monetário associado, sabe-se que, à partida, um veículo com menor peso, vai oferecer menor desgaste mecânico de todo o sistema de suspensões, direção, pneus, caixa de velocidades e até mesmo do motor.

9. Conclusões e trabalhos futuros

O desenvolvimento deste projeto permite afirmar que o AEROFEUPBUS tem potencial para se afirmar no mercado dos autocarros de aeroporto. A solução construtiva proposta passa pela utilização da técnica de enrolamento filamentar húmido de uma carroçaria em sanduíche, com características mecânicas semelhantes ao COBUS. Tal permitirá baixar os custos na sua compra e reduzir o tempo de ciclo na montagem da estrutura, graças a uma maior integração de componentes na carroçaria em compósito.

O problema associado a este projeto prende-se com o acabamento exterior que esta técnica construtiva apresenta, sendo esta a principal desvantagem do AEROFEUPBUS. Como foi referido existem já técnicas para o acabamento da carroçaria com melhor qualidade (VARTM) mas, em Portugal, não são utilizadas em escalas tão grandes. Isto fez com que o orçamento que foi apresentado pela empresa A fosse à partida descartado, devido à diferença de custo muito elevada. Em países onde o desenvolvimento do estudo da técnica de enrolamento filamentar vai mais além dos perfis tubulares e dos depósitos de água cilíndricos talvez já se consiga optar pelo enrolamento filamentar a seco e posterior VARTM a um custo aceitável/viável. Assim sendo, foi considerado que na secção da pintura iria haver um aumento de 10 horas de trabalho, por autocarro, para se proceder a uma melhoria da superfície exterior do AEROFEUPBUS reduzindo mesmo assim 100 horas de mão-de-obra no total. Isto significa que no tempo de ciclo construtivo de sete COBUS iriam ser produzidos oito AEROFEUPBUS.

O estudo de propagação do dano mostra-se bastante importante aquando da comparação da versão 1 com a versão 2. Como se pode concluir, as exigências estruturais dum autocarro de circulação urbana que respeitam as leis europeias são muito maiores. Isto levou a uma redução de 44% do peso da estrutura, aquando do melhoramento e novo cálculo da versão 2 do AEROFEUPBUS. Isto demonstra que é possível alargar um estudo deste género a algumas versões urbanas, conseguindo assim melhorar um dos problemas frequentes de corrosão do aço que levam a intervenções de manutenção extremamente exigentes e dispendiosas no ciclo de vida destes autocarros.

Do ponto de vista do projeto de investimento, mostra-se que este é viável, sendo um projeto onde o *payback* é muito baixo, se relacionado com a duração do mesmo (5 anos). Isto garante à CaetanoBus uma rápida recuperação do capital investido, bem como, uma margem de segurança. É uma técnica pioneira em todo o mundo o que colocaria a CaetanoBus numa posição privilegiada face à concorrência no setor dos autocarros de aeroporto. O AEROFEUPBUS reúne uma série de mais-valias para os seus compradores que passam pela redução anual nos custos com o combustível de 175 mil € por autocarro e, sendo um autocarro mais leve no seu conjunto, espera-se que haja uma maior fiabilidade mecânica ao nível de suspensões, motor e sistema de transmissão o que vai permitir uma redução nos custos com a manutenção preventiva e, uma menor frequência de manutenção corretiva. O LCC é francamente mais reduzido, em grande parte devido aos ganhos operacionais com a redução no consumo de combustível. Não existe informação disponível acerca do fim de vida do COBUS mas, no entanto, sabe-se que a reciclagem do alumínio está muito mais difundida do que a reciclagem dos compósitos, o que se revela num ponto negativo do AEROFEUPBUS. No entanto, a durabilidade destas carroçarias é à partida superior devido à grande capacidade de resistir à corrosão e às intempéries por parte dos compósitos.

Como o projeto se mostrou viável economicamente, recomenda-se para o futuro, um aprofundamento do mesmo e a tentativa de produzir o AEROFEUPBUS através de enrolamento filamentar a seco e posterior VARTM junto de fornecedores estrangeiros especialistas na área e a um custo que seja possível de comportar. Existe um número elevado de peças constituintes do COBUS que, quando produzidas em material compósito, podem melhorar a sua resistência e reduzir o peso do conjunto. Recomenda-se por isso um estudo alargado a cada componente do COBUS, que possa ser fabricado em PRFV, em prol de um melhor desempenho e de uma maior responsabilidade social.

O chassis no qual se montam as estruturas do COBUS e onde se vai montar o AEROFEUPBUS, são essencialmente metálicos (em aço). Considera-se que seria positivo e de máximo interesse para a CaetanoBus, efetuar um estudo para um conjunto carroçaria + chassis em material compósito, que albergasse as ligações para a motorização, para o sistema motriz (e.g. eixos, suspensões, direção), o que iria certamente reduzir o peso do conjunto e melhorar a performance do mesmo. No limite poderiam ser substituídos os motores por outros de menor potência e o sistema de transmissão por outro fabricada para um sistema com menor inércia.

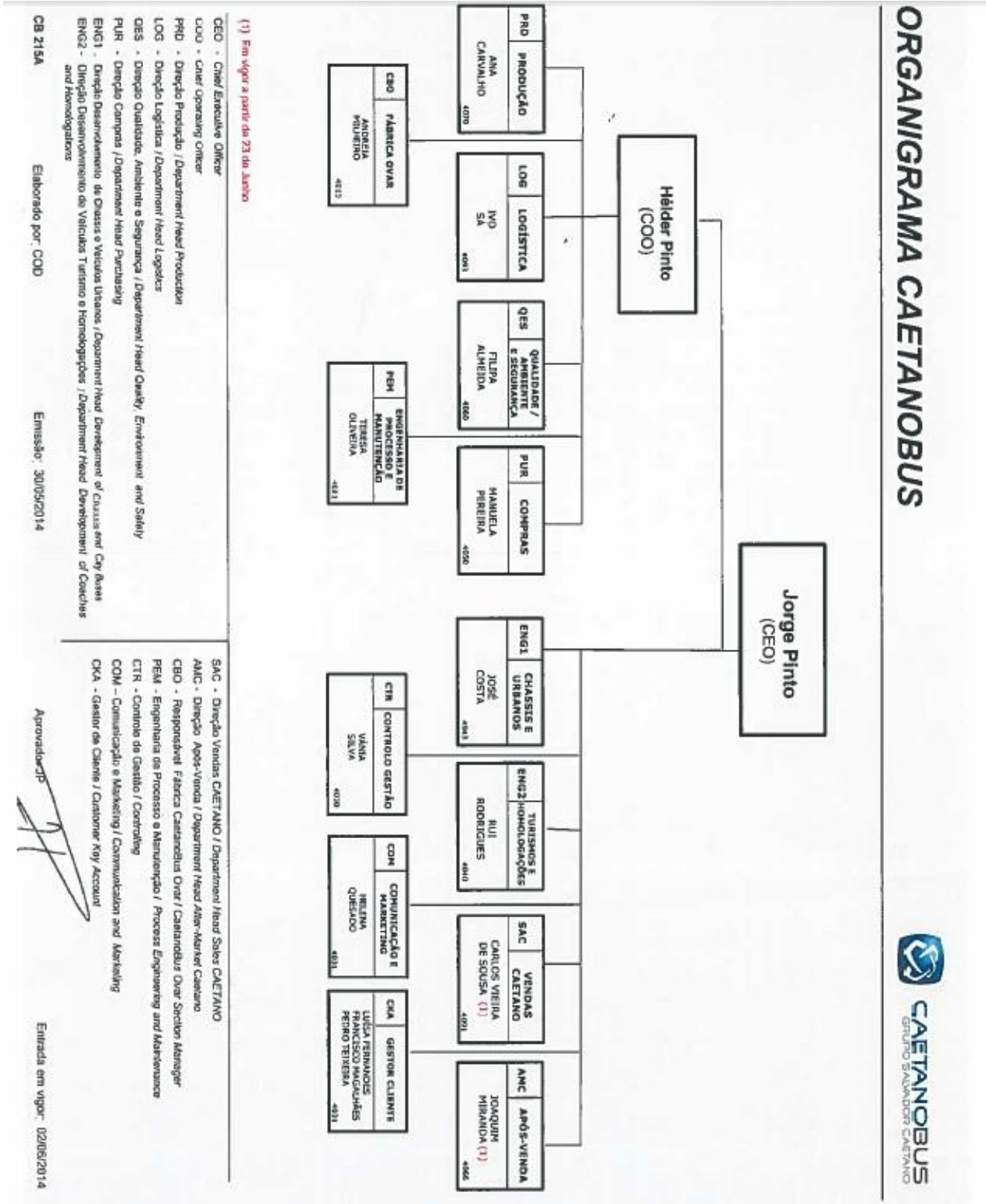
Referências Bibliográficas

- Advani Suresh G. e Sozer E. Murat (2003), “*Overview of Manufacturing Processes*”;
- Almeida Pedro Miguel Vasques Eusébio da Costa (2008), “FEUPBUS/CIVITAS”, Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica; Universidade do Porto;
- Campbell, F. C. (2004), “*Manufacturing processes for advanced composites*”. Elsevier;
- Candeias, David Miguel Quendera (2009), “*Estudo das tensões interlaminares e rotura de elementos curvos em materiais compósitos*”, Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa;
- CaetanoBus, SA. Disponível em:
<http://www.caetanobus.pt/wps/wcm/connect/gscgeneral/CaetanoBus/CaetanoBus/menu/empresa/historia>;
- (Cerruti Pierfrancesco, Avella Maurizio, Errico Maria Emanuela, Malinconico Mario e Corvino Raffaele (2014), “*New life for aircraft waste composites*”, Society of Plastics Engineers;
- CPIC Fiberglass <http://br.cpicfiber.com/arquivos/processos/enrolamento-filamentar.jpg>
- COMPOSITES UPDATE, 2009, UNIVERSITY OF DELAWARE CENTER FOR COMPOSITE MATERIALS
HTTP://WWW.CCM.UDEL.EDU/NEWS/NEWSLETTER/2009/FEB09/FEB09_PRINTABLE.HTML
;
- Crump Duncan Andrew (2009), “*Performance Analysis of a Reduced Cost Manufacturing Process for Composite Aircraft Secondary Structure*”, University of Southampton, Faculty of Engineering, Science & Mathematics;
- Dai J., Pellaton D. e Hahn H. T. (2004), “*A Comparative Study of Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) for Sandwich Panels*”, Mechanical & Aerospace Engineering Department, Wiley Online;
- Damodoran (2014), <http://people.stern.nyu.edu/adamodar/>
- Design Studio FEUP , <http://www.dsfpjects.blogspot.pt>, <http://4.bp.blogspot.com/-OIVvw1nxy9U/T1ETQV3XwCI/AAAAAAAAABSw/albBdCJINOQ/s1600/DSC00022.JPG>;
- Dhillon B. S. (1947), “*Life Cycle Costing for Engineers*”;
- Dhyani Anupam (2008), “*VARTM Process with some modifications*”, Michigan State University, Mechanical engineering;
- Drury Colin (1998), “*Management and cost accounting*”;
- European Environment Agency (2008), “*Greenhouse gas emission trends and projections in Europe 2008*”, Tracking progress towards Kyoto targets Report No. 5;
www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2008_5;
- Gay Daniel, Hoa Suong V. (2007), “*Composite Materials Design and Applications*”, 2nd edition;
- Goodship Vannessa (2007), “*Introduction to Plastics Recycling*”, 2nd edition;

- Goodship Vannessa (2010), “*Management, recycling and reuse of waste composites*”, CRC Press;
- Hashin, Zvi; Rotem, Arava (1973), “*A Fatigue Failure Criterion for Fiber Reinforced Materials*”, Journal of Composite Materials. Vol. 7;
- Hoffman Jean (2008), “*Stronger and lighter – Composites Mate their Mark*”;
- Jones Robert M. (1999), “*Mechanics of Composite Materials*”;
- Kaw Autar K. (2006), “*Mechanics of Composite Materials*”, 2nd edition;
- Kim Seong Yun, Noh Ye Ji e Youn Jae R. (2014), “*High-speed fabrication of thermoplastic carbon-fiber fabric composites*”, Society of Plastics Engineers;
- Kindervater C. M. e Georgi H. (2010), “*Composite strenght and Energy Absorption as na aspect of structural crash resistance*”, Chapter 6, Taylor and Francis;
- Ko H., Shin K., Jeon K. e Cho S. (2008), “*A study on the crashworthiness and rollover characteristics of low-floor bus made of sandwich composites*”;
- Lopes Maria Dulce Soares (2012), “*Elaboração e análise de Projetos de Investimento*” 2ª edição;
- Mazumdar Sanjay K. (2002), “*Composites Manufacturing – Materials Product and Process Engineering*”;
- Neves P. C., Fernandes A. A., e Ferreira A.J.M. (2009), “*Crashworthiness of vehicle composite sandwich structures*”;
- Quick Darren (2010), “*All-eletric bus picking up passengers in Southern California*”, <http://www.gizmag.com/proterra-ecoride-be35-bus/16195/picture/119824/>
- Real Sofia Alexandra de Carvalho Ferreira (2010), “*Contributo da análise dos custos de ciclo de vida para projectar a sustentabilidade na construção*”, Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa;
- Robert J. Brown e Rudolph R. Yanuck (1985), “*Introduction to Life Cycle Costing*”;
- Rosato D.V.e Grove C.S. Jr. (1964), “*Filament Winding: Its development, manufacture, applications, and design*”;
- Sherif, Y. S., e Kolarik, W. J. (1981), “*Life cycle costing concepts and practice*”;
- Subic Aleksandar e Schiavone Francesco (2006), “*Design-oriented application of LCA to an automotive system*”, 5th Australian Conference on Life Cycle Assessment;
- Sun Xiudong, Li Shouljie e Lee L. James (2004), *Mold Filling Analysis in Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding: Part I: SCRIMP Based on a High-Permeable Medium*, The Ohio State University, Wiley Online;
- Töpker Jochen e Michaeli Walter (2001), “*Process Control of Resin Transfer Molding (RTM) by Ultrasonics*”, Institute of Plastics Processing);
- US F1 Team (2009) © www.formula1.com/gallery/other/2010/430.html;
- Volpe John A. (2011), “*Bus Lifecycle Cost Model for Federal Land Management Agencies*”, Nacional Transportation Systems Center – U.S. Department of Transportation;

Winkel John (2009), “*Team-built bus body bests al*’l”, Composites Technology
<http://www.compositesworld.com/articles/team-built-bus-body-bests-all> ;
www.busworld.org (2010), *Seul starts commercial operation of battery electric buses*,
<http://www.busworld.org/articles/detail/1082>
www.iho.hu, http://iho.hu/img/kozut/1201/120130_nabi/compo.jpg;

ANEXO A - Organigrama da CaetanoBus



ANEXO B - Propriedades das fibras utilizadas habitualmente

(tabela 1.3 de Gay Daniel, Hoa Suong V., 2007)

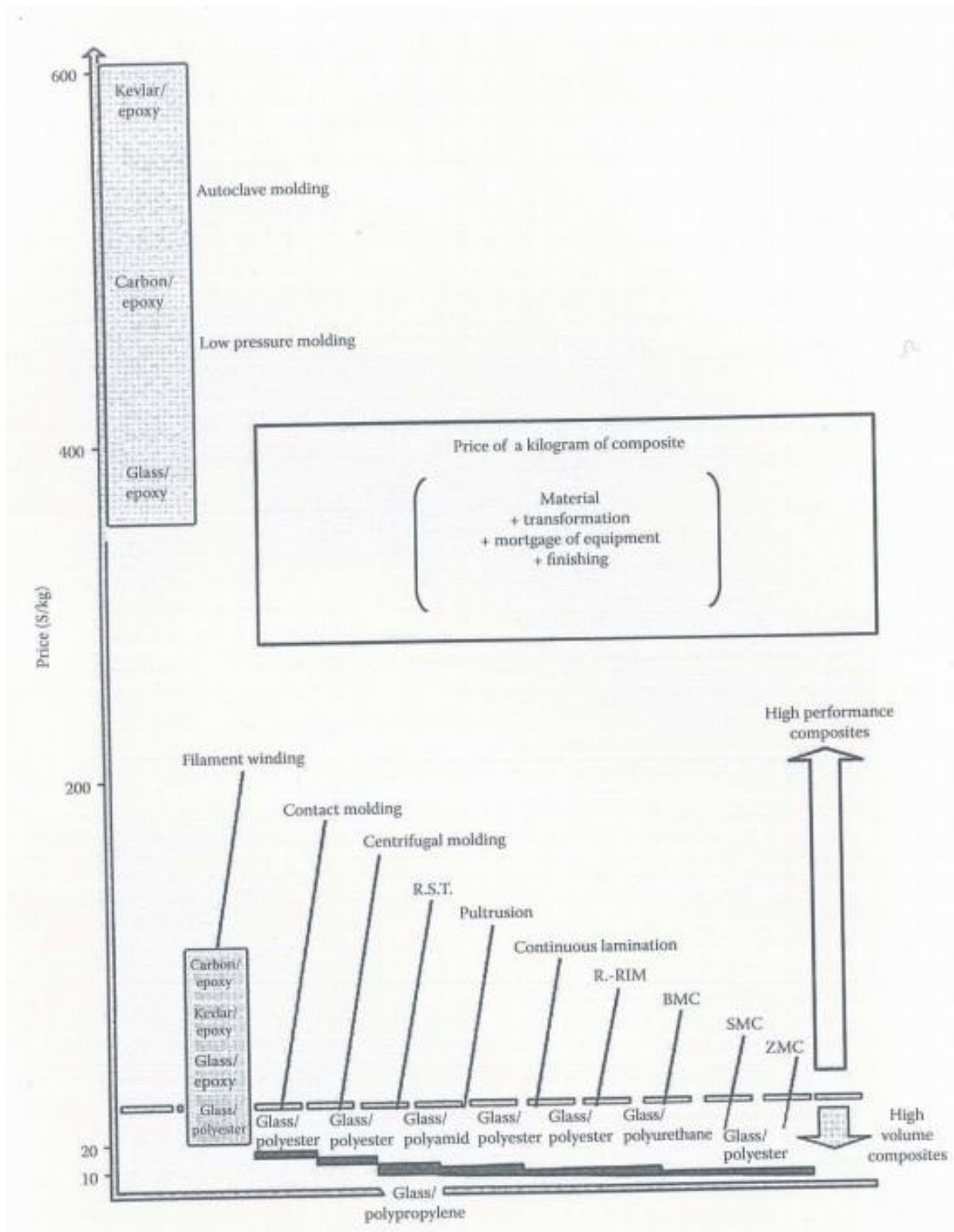
Reinforcements	Fiber Diameter $d(\mu m)$	Density $\rho(kg/m^3)$	Modulus of Elasticity $E(Mpa)$	Shear Modulus $G(Mpa)$	Poisson Ratio ν	Tensile Strength $\sigma_{ult}(Mpa)$	Elongation $E(\%)$	Coefficient of Thermal Expansion $\alpha(^{\circ}C^{-1})$	Coefficient of Thermal Conductivity $\lambda(W/M^{\circ}C)$	Heat Capacity $c(J/kg^{\circ}C)$	Useful Temperature Limit $T_{max}(^{\circ}C)$	Price $(\$/kg)$
"R" glass, high performance	10	2500	86,000		0.2	3200	4	0.3×10^{-5}	1	800	700	14
"E" glass, common applications	16	2600	74,000	30,000	0.25	2500	3.5	0.5×10^{-5}	1	800	700	2
Kevlar 49	12	1450	130,000	12,000	0.4	2900	2.3	-0.2×10^{-5}	0.03	1400	>1500	70
"HT" graphite, high strength	7	1750	230,000	50,000	0.3	3200	1.3	0.02×10^{-5}	200 (20^{\circ}C) 60 (800^{\circ}C)	800	>1500	70
"HM" graphite, high modulus	6.5	1800	390,000	20,000	0.35	2500	0.6	0.08×10^{-5}	200 (20^{\circ}C) 60 (800^{\circ}C)	800	>1500	140
Boron	100	2600	400,000			3400	0.8	0.4×10^{-5}			500	500
Aluminum	20	3700	380,000			1400	0.4		50 (20^{\circ}C) 7 (800^{\circ}C)	900	>1000	
Aluminum silicate	10	2600	200,000			3000	1.5					
Silicon carbide	14	2550	200,000			2800	1.3	0.5×10^{-5}			1300	600
Polyethylene		960	100,000			3000					150	

ANEXO C - Propriedades das resinas utilizadas habitualmente


(tabela 1.4 de Gay Daniel, Hoa Suong V., 2007)

Resins	Density ρ (kg/m^3)	Elastic Modulus E(Mpa)	Shear Modulus G(Mpa)	Poisson Ratio ν	Tensile Strength σ_{th} (Mpa)	Elongation E%	Coefficient of Thermal Expansion α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Coefficient of Thermal Conductivity λ (W/m $^{\circ}\text{C}$)	Heat Capacity C(J/kg $^{\circ}\text{C}$)	Useful Temperature Limit T_{max} ($^{\circ}\text{C}$)	Price (\$/kg)
Epoxy	1200	4500	1600	0.4	130	2 (100 $^{\circ}\text{C}$) 6 (200 $^{\circ}\text{C}$)	11×10^{-5}	0.2	1000	90 to 200	6 to 20
Phenolic	1300	3000	1100	0.4	70	2.5	1×10^{-5}	0.3	1000	120 to 200	20
Polyester	1200	4000	1400	0.4	80	2.5	8×10^{-5}	0.2	1400	60 to 200	2.4
Polycarbonate	1200	2400		0.35	60		6×10^{-5}		1200	120	
Vinylester	1150	3300			75	4	5×10^{-5}			>100	4
Silicone	1100	2200		0.5	35					100 to 350	4
Urethane	1100	700 to 7000			30	100				100	4
Polyimide	1400	4000 to 19,000	1100	0.35	70	1	8×10^{-5}	0.2	1000	250 to 300	
Polypropylene (pp)	900	1200		0.4	30	20 to 400	9×10^{-5}		330	70 to 140	
Polyphenylene sulfone (pps)	1300	4000			65	100	5×10^{-5}			130 to 250	
Polyamide (pa)	1100	2000		0.35	70	200	8×10^{-5}		1200	170	6
Polyether sulfone (pes)	1350	3000			85	60	6×10^{-5}			180	25
Polyetherimide (pei)	1250	3500			105	60	6×10^{-5}	0.2		200	20
Polyether-ether-ketone (peek)	1300	4000			90	50	5×10^{-5}	0.3		140 to 250	96

**ANEXO D - Custo de diferentes processos de fabrico com diferentes matrizes e fibras
(Figura 2.17 de Gay Daniel, Hoa Suong V., 2007)**



ANEXO E – Ficha técnica do alumínio 6106 (www.nedalextrusion.com)



ALLOY DATA SHEET

EN AW-6106 [AlMgSiMn]

Type:
General
extrusion alloy

The 6106 alloy is an extrusion alloy designed to provide an optimum combination of mechanical properties, complexity of shape, minimum section thickness and good surface finish together with the good resistance, weldability and formability. Very complex shapes are possible, which cannot be not obtained with stronger alloys such as 6082. The minor addition of Mn serves to refine the metal structure, thus enhancing formability and surface quality after subsequent forming operations. The alloy EN AW-6106 is suitable for applications where modest strength properties are required. Typical application fields are carbody parts, tubes and conductors.

Chemical composition according to EN573-3 (weight%, remainder Al)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	remarks	others
									each
0.30 – 0.6	max. 0.35	max. 0.25	0.05-0.20	0.45 – 0.8	max 0.20	max 0.10	-		max 0.05
									total max 0.10

Mechanical properties according to EN755-2

Temper*	Wallthickness e	Yield stress Rp0.2 [MPa]	Tensile strength Rm [MPa]	Elongation A [%]	A50mm [%]	Hardness** HB
T6	e ≤ 10	200	250	8	6	70

* Temper designation according to EN515: T6-Solution heat treated, quenched and artificially aged, T66-cooled from an elevated temperature forming operation and artificially aged to a condition with higher mechanical properties through special control of manufacturing processes. (T6/T66 properties can be achieved by press quenching)

** Hardness values are for indication only

Physical properties (approximate values, 20 °C)

Density [kg/m ³]	Melting range [°C]	Electrical conductivity [MS/m]	Thermal conductivity [W/m.K]	Co-efficient of thermal expansion 10 ⁻⁶ /K	Modulus of elasticity [GPa]
2700	585-650	28-34	200-220	23.4	~70

Weldability¹

Gas: 3 TIG: 2 MIG: 2

Typical filler materials (EN ISO18273): SG-AlMg5Cr(A) or AISi5, and AlMg3 when the product has to be anodised. Due to the heat input during welding the mechanical properties will be reduced by approximately 50% (ref. EN1999-1).

Machining characteristics¹:

T4 temper: 3 T6 temper: 2

Coating properties¹

Hard/protective anodising: 1 Decorative/bright/colour anodising: 2

Corrosion resistance¹

General: 1 Marine: 2

¹ Relative qualification ranging from 1-very good to 6 – unsuitable

Nedal Aluminium
P.O.-Box 2020
NL-3500 GA Utrecht, The Netherlands
T. +31 30 2925711 F. +31 30 2939512
sales@nedal.nl www.nedal.com

Alloy data sheet
EN AW-6106

jun-2007

rev.00

ANEXO F – Lista de peças constituintes do módulo central do COBUS

Código	Quantidade	Designação	Material	Massa (kg)
AG 4833-03	22	Canto	Al	3,322
110979 (204608)	132	Perfil de aperto do canto	Al	2,244
Cobolt (204610)	124	Parafuso de aperto do canto	Aço	1,24
41353501	1	Travessa central teto	Al	5,946
51256108_CS	1	Travessas teto (conjunto azul)	Al	15,545
41353403	1	Sanca E	Al	20,846
41353404	1	Sanca D	Al	20,846
Perfil Pav. Al 2690	6	Painéis chão	Al	144,707
-	6	Revestimento do chão	Borracha	12,367
51618101	2	Revestimento inferior	ABS	-
51618301	4	Tampas do revestimento inferior	Al	0,991
51618401	4	Base das tampas de revestimento inf	Al	0,785
36871553	2	Revestimento intermédio	Laminite	9,539
51297009	4	Revestimento superior	Laminite	3,349
-	4	Revestimento ABS	ABS	-
51588201	4	Pilares principais	Al	53,845
AG 6222-06	8	Cantos da janela	Al	1,176
-	4	Parafusos dos cantos da janela	Aço	0,048
52674402	1	Painel exterior lateral E	Al	16,382
52674401	1	Painel exterior lateral D	Al	16,382
Pos 1 de 51588501	2	Canto de fixação base/lateral E	Aço	7,123
Pos 2 de 51588501	2		Aço	7,123
Pos 3 de 51588502	2	Canto de fixação base/lateral D	Aço	7,123
Pos 4 de 51588502	2		Aço	7,123
51333100 (51333111)	2	Perfil da base	Al	19,120
379421	4	Perfil 1 de aperto da base	Al	1,130
51593001	4	Perfil 2 de aperto da base	Al	0,906
51593002	4	Perfil 3 de aperto da base	Al	1,216
59103302	2	Janela abatível	Vidro	-
Caixilho+Pega (51599602)	2	Caixilho da janela abatível	Al	-
Dobradiça (EL)	2	Dobradiça da janela abatível	Al	-
51599602	2	Janela principal	Vidro	-
59103703	2	Suporte inferior (cor-de-rosa)	Aço	0,270
51590810	1	Painel E (antes do revestimento)	Al	6,763
51590811	1	Painel D (antes do revestimento)	Al	6,763
AG 6221-05	4	Cantos pequenos (azul ciano)	Al	0,272
41355904	4	Cantoneiras (verde)	Aço	1,093
-	4	Parafuso das cantoneiras (verde)	Aço	0,044
455119-Prfa	4	Parafuso M8x26 (52077701)	Aço	0,065
455119-Anilha	4	Anilha Roscada M8 (52977701)	Aço	0,007
356266	4	Casquilho	Al	0,026
51592701	4	Patelas (verde claro)	Aço	2,769
59103228	4	Espaçador para fixação do chão	Aço	3,799
TOTAL	398			402,299

ANEXO G – Lista de peças constituintes do módulo central do AEROFEUPBUS

Código	Quantidade	Designação	Material	Massa (kg)
-	1	Corpo central	Sanduíche de compósitos	-
59103302	2	Janela abatível	Vidro	-
Caixilho+Pega (51599602)	2	Caixilho da janela abatível	Al	-
Dobradiça (EL)	2	Dobradiça da janela abatível	Al	-
51599602	2	Janela principal	Vidro	-
51618101	2	Revestimento inferior	ABS	-
-	4	Revestimento ABS	ABS	-
-	4	Insertos	Contraplacado	-
-	4	Chapa de aço com 15 mm	Aço	-
AEROFEUPBUS versão 1	23	TOTAL		359
AEROFEUPBUS versão 2	23	TOTAL		200

ANEXO H – Imagens representativas do início de propagação de dano do AEROFEUPBUS versão 2

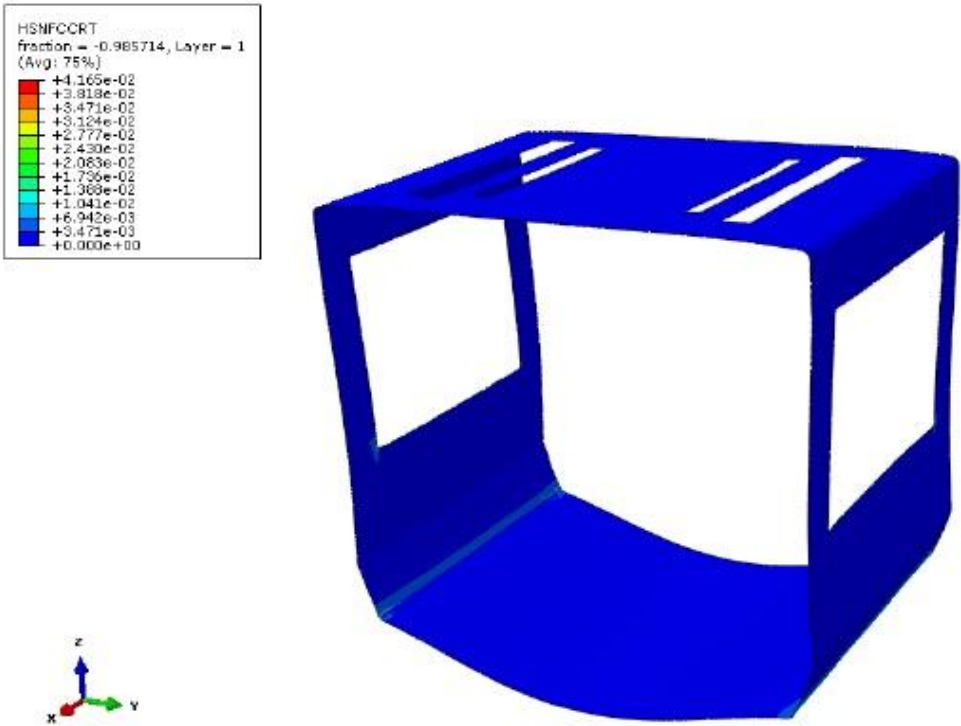


FIGURA 25 – MÓDULO SEM REFORÇO, SUJEITO A UMA ACELERAÇÃO VERTICAL DE 3 G – FALHA DAS FIBRAS À COMPRESSÃO

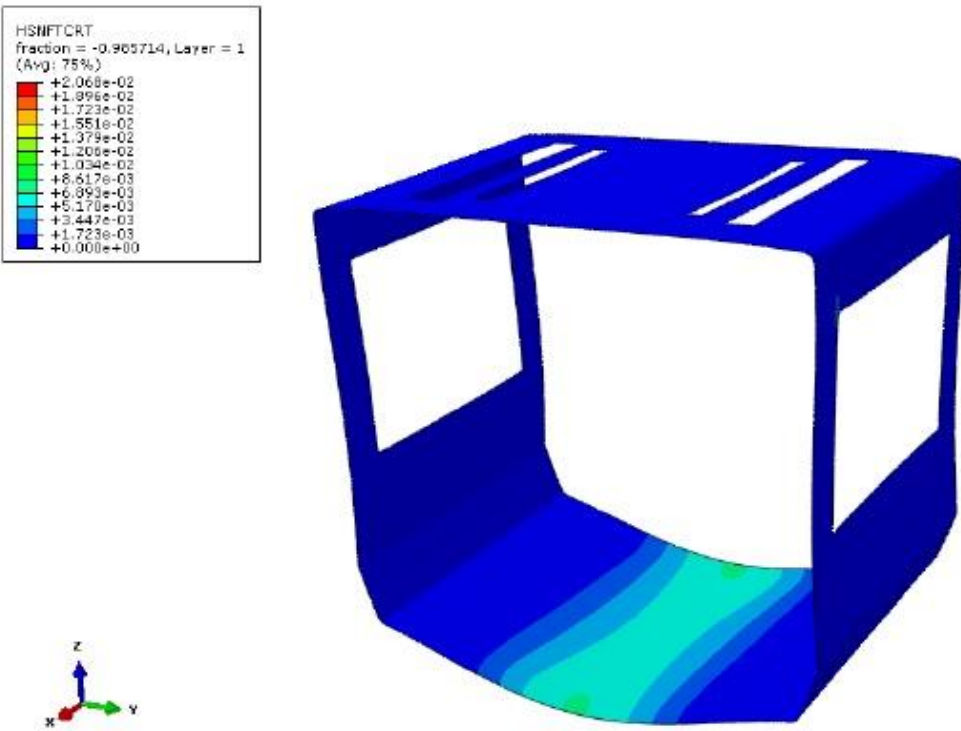


FIGURA 26 - MÓDULO SEM REFORÇO, SUJEITO A UMA ACELERAÇÃO VERTICAL DE 3 G – FALHA DAS FIBRAS À TRAÇÃO

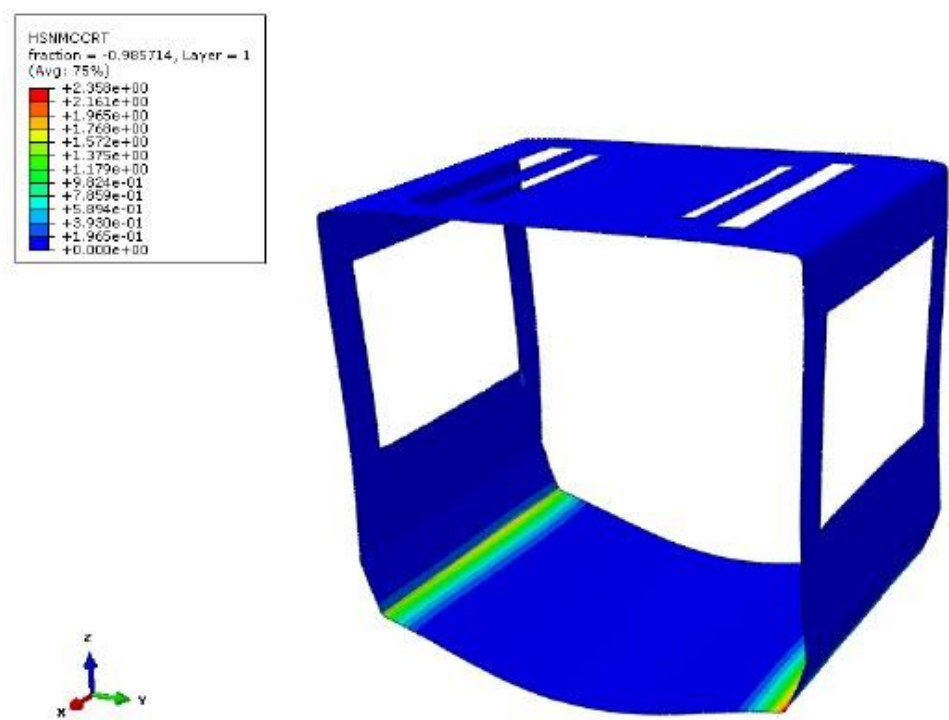


FIGURA 27 - MÓDULO SEM REFORÇO, SUJEITO A UMA ACELERAÇÃO VERTICAL DE 3 G –
FALHA DA MATRIZ À COMPRESSÃO

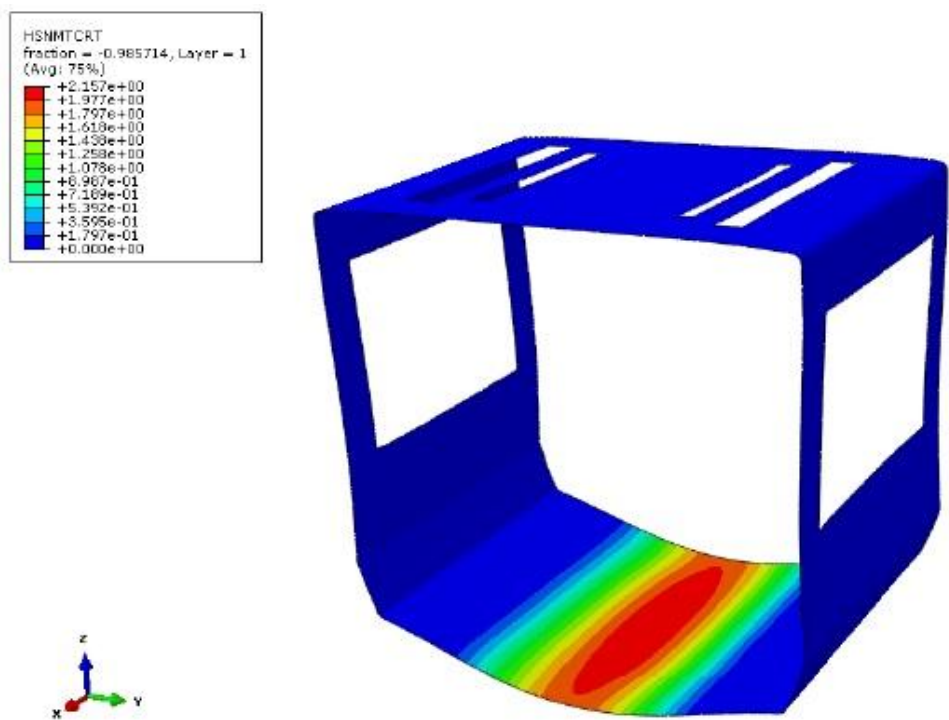


FIGURA 28 - MÓDULO SEM REFORÇO, SUJEITO A UMA ACELERAÇÃO VERTICAL DE 3 G –
FALHA DAS FIBRAS À TRAÇÃO

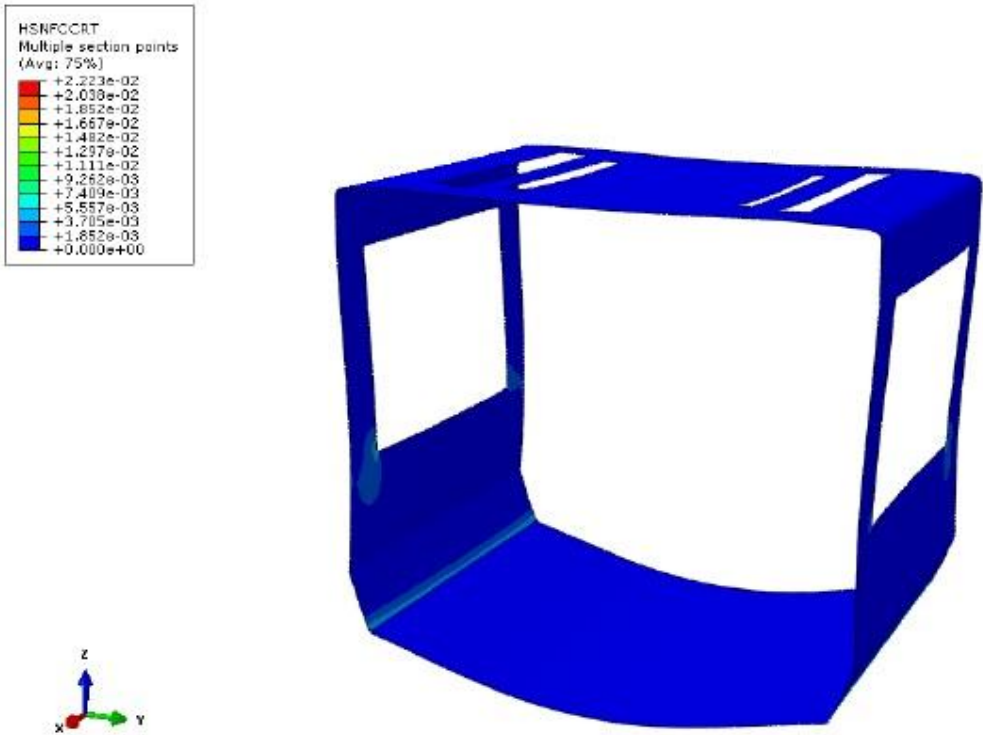


FIGURA 29 - MÓDULO COM REFORÇO, SUJEITO A UMA ACELERAÇÃO VERTICAL DE 3 G – FALHA DAS FIBRAS À COMPRESSÃO

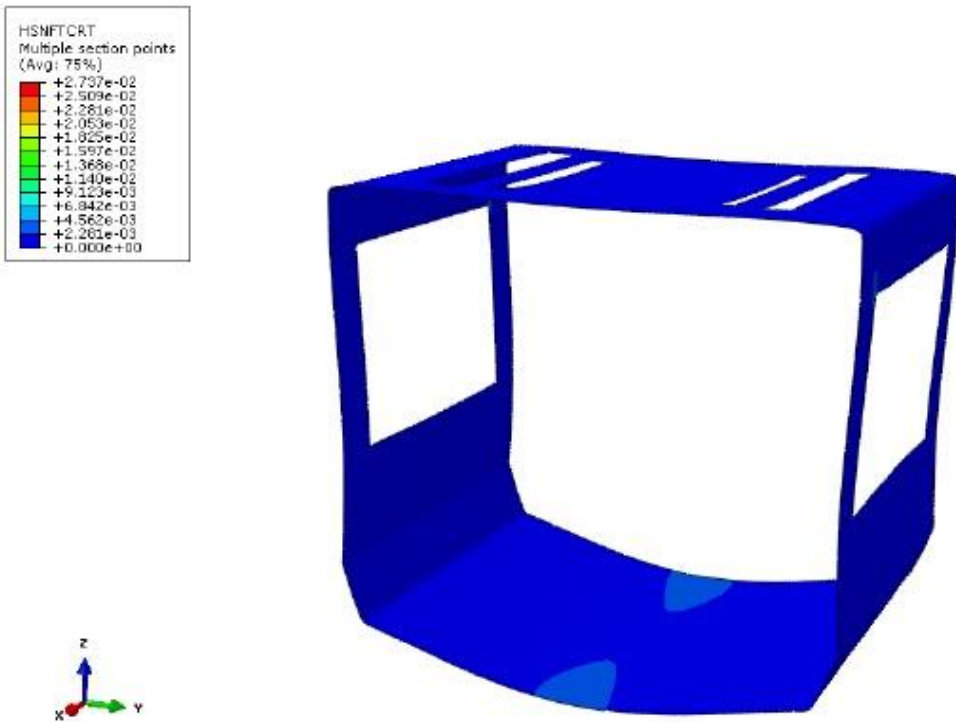


FIGURA 30 - MÓDULO COM REFORÇO, SUJEITO A UMA ACELERAÇÃO VERTICAL DE 3 G – FALHA DAS FIBRAS À TRAÇÃO

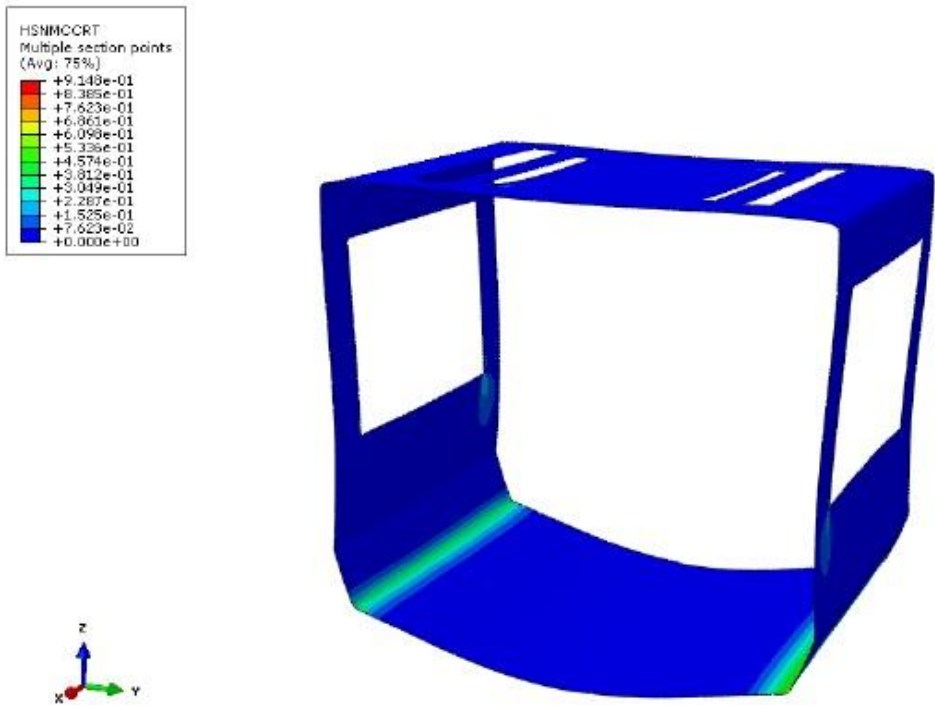


FIGURA 31 - MÓDULO COM REFORÇO, SUJEITO A UMA ACELERAÇÃO VERTICAL DE 3 G – FALHA DA MATRIZ À COMPRESSÃO

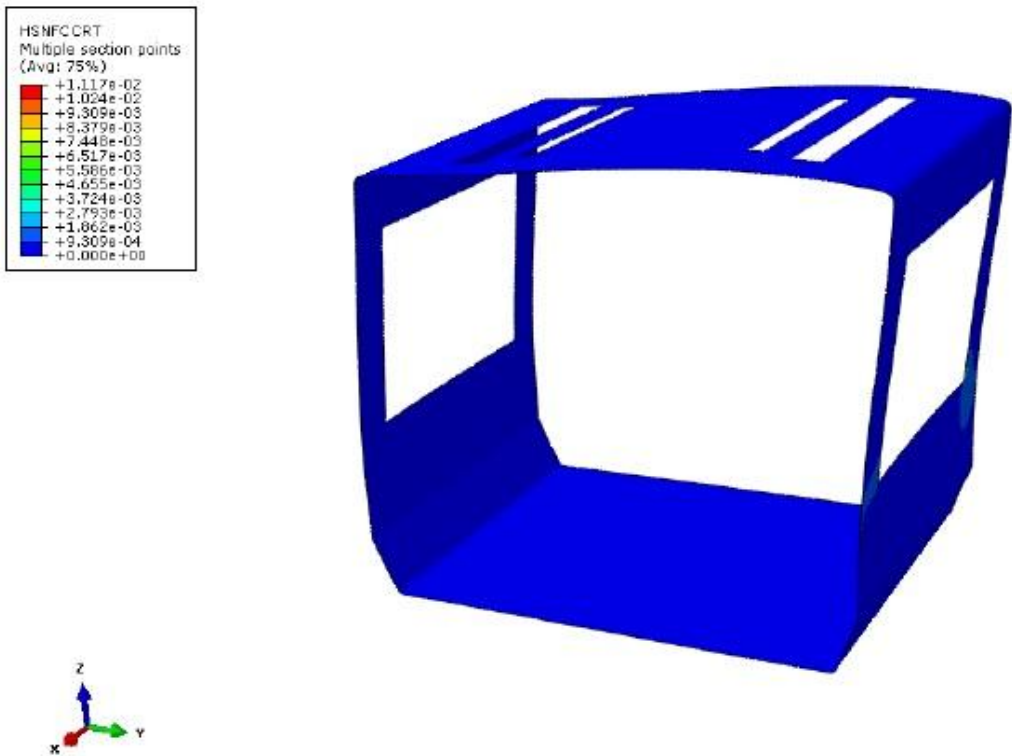


FIGURA 32 - MÓDULO COM REFORÇO, SUJEITO A UMA ACELERAÇÃO LATERAL DE 1,25 G – FALHA DAS FIBRAS À COMPRESSÃO

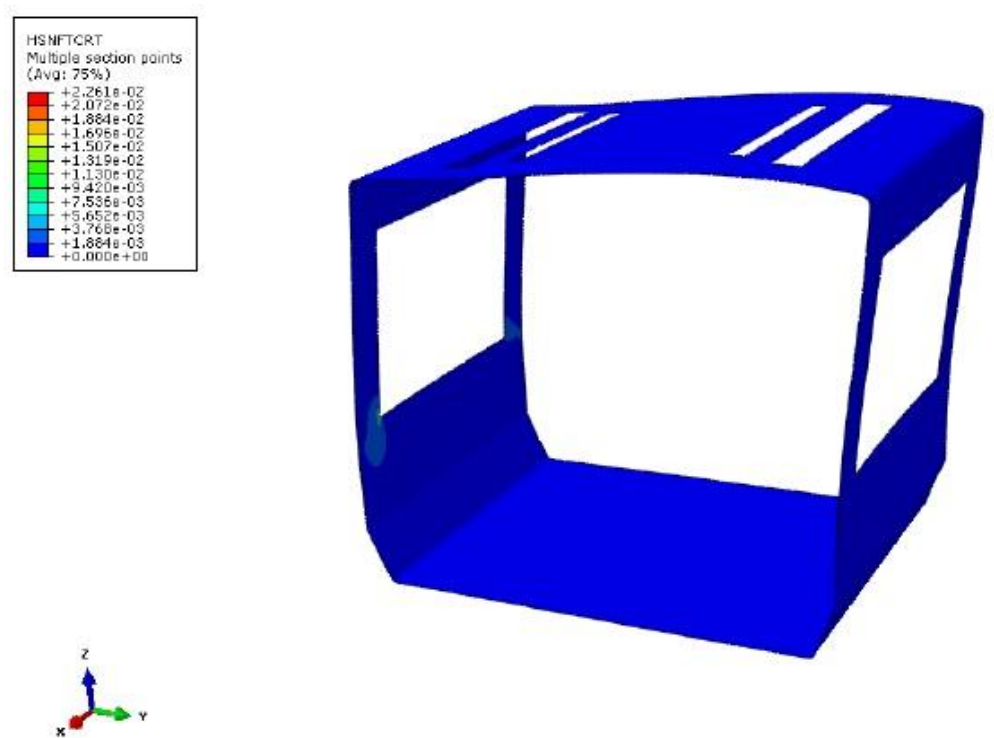


FIGURA 33 - MÓDULO COM REFORÇO, SUJEITO A UMA ACELERAÇÃO LATERAL DE 1,25 G – FALHA DAS FIBRAS À TRAÇÃO

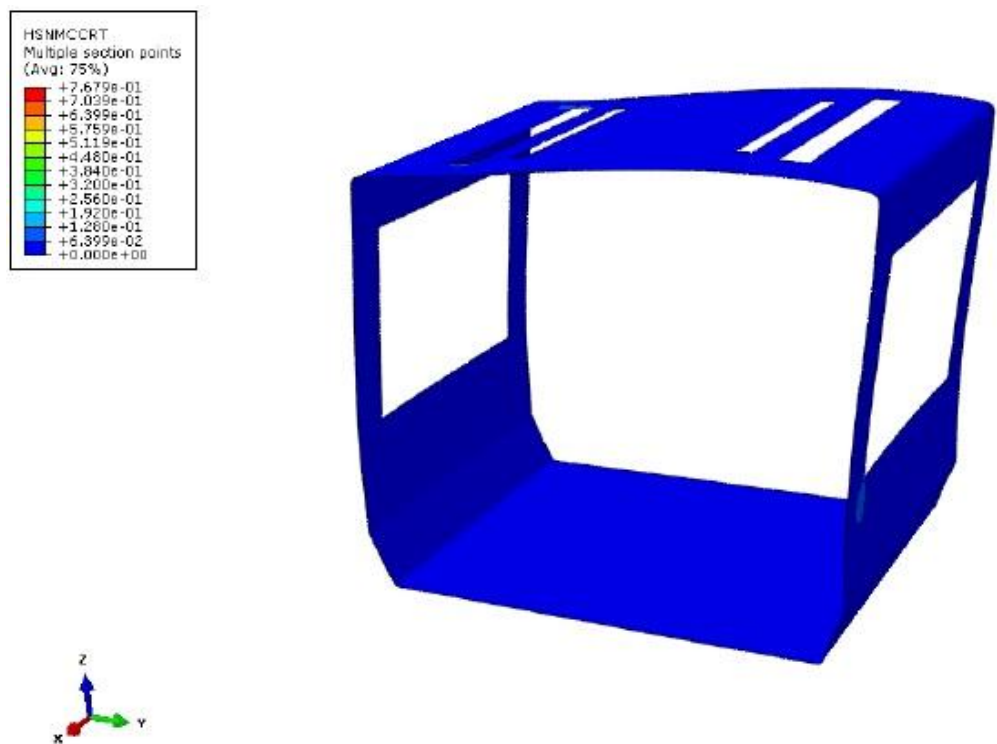


FIGURA 34 - MÓDULO COM REFORÇO, SUJEITO A UMA ACELERAÇÃO LATERAL DE 1,25 G – FALHA DA MATRIZ À COMPRESSÃO

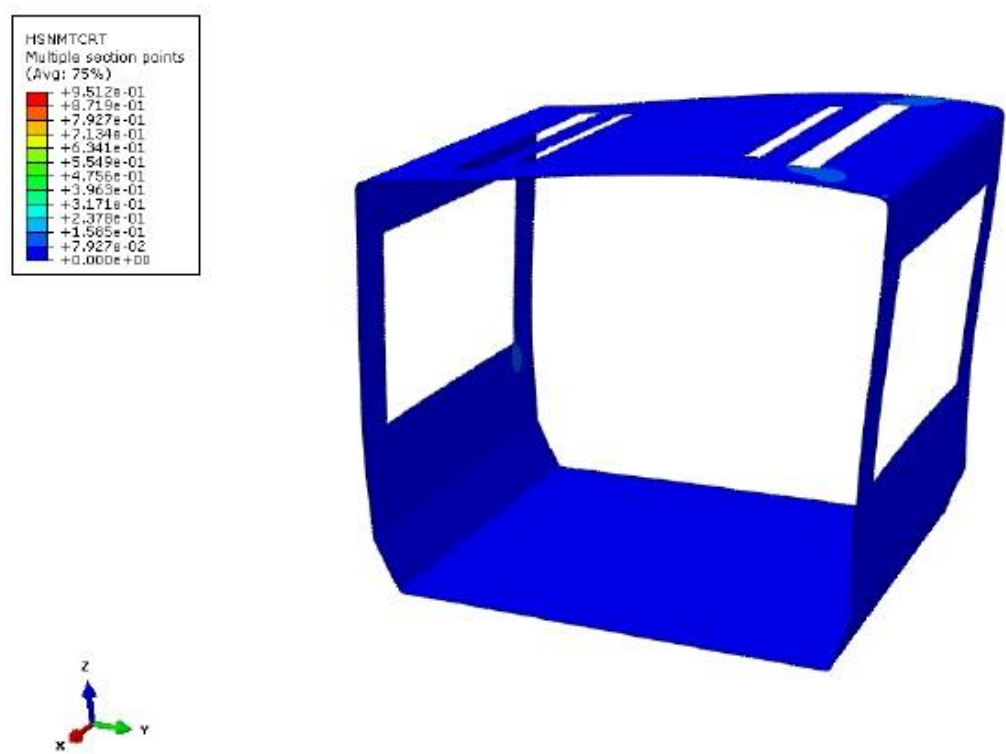


FIGURA 35 - MÓDULO COM REFORÇO, SUJEITO A UMA ACELERAÇÃO LATERAL DE 1,25 G – FALHA DA MATRIZ À TRAÇÃO

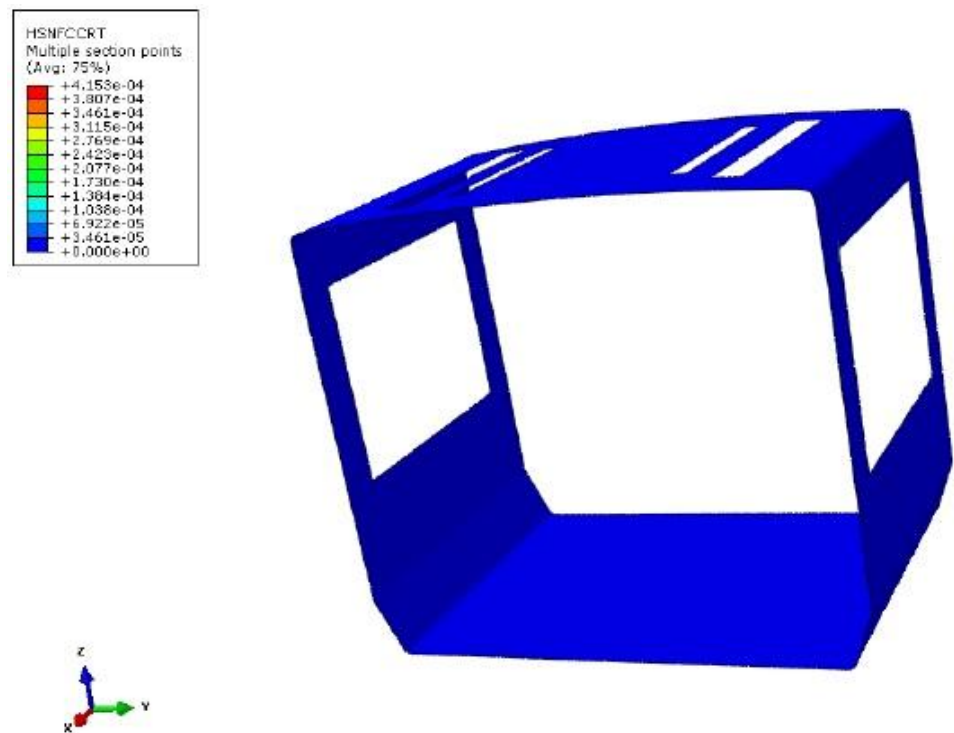


FIGURA 36 - MÓDULO COM REFORÇO, SUJEITO A UMA ACELERAÇÃO LONGITUDINAL DE 0,75 G – FALHA DAS FIBRAS À COMPRESSÃO

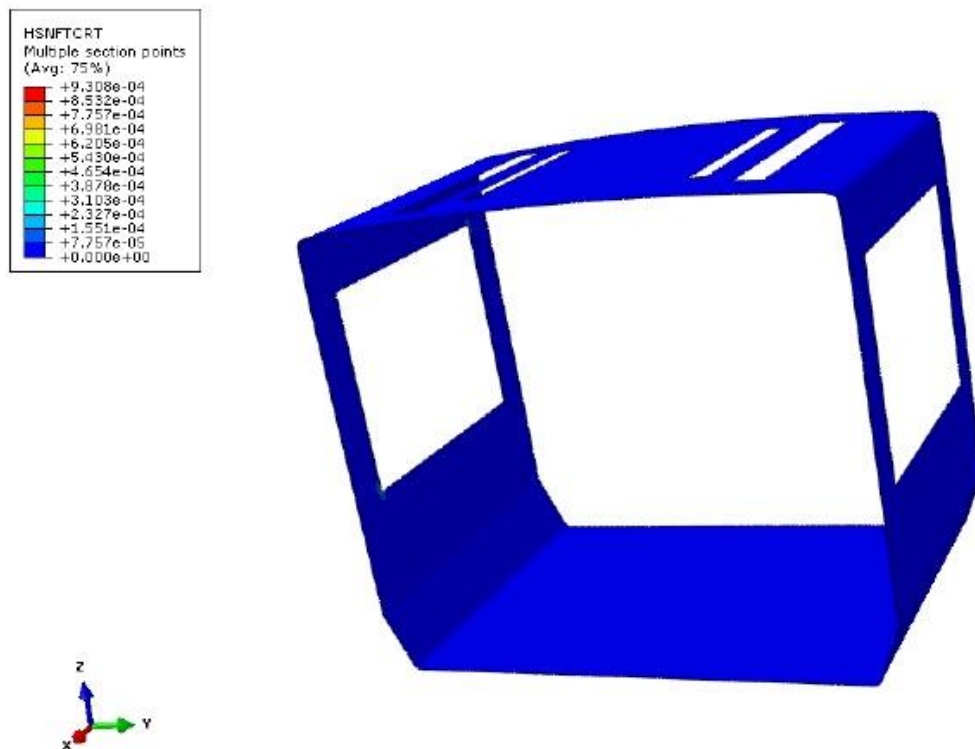


FIGURA 37 - MÓDULO COM REFORÇO, SUJEITO A UMA ACELERAÇÃO LONGITUDINAL DE 0,75 G – FALHA DAS FIBRAS À TRAÇÃO

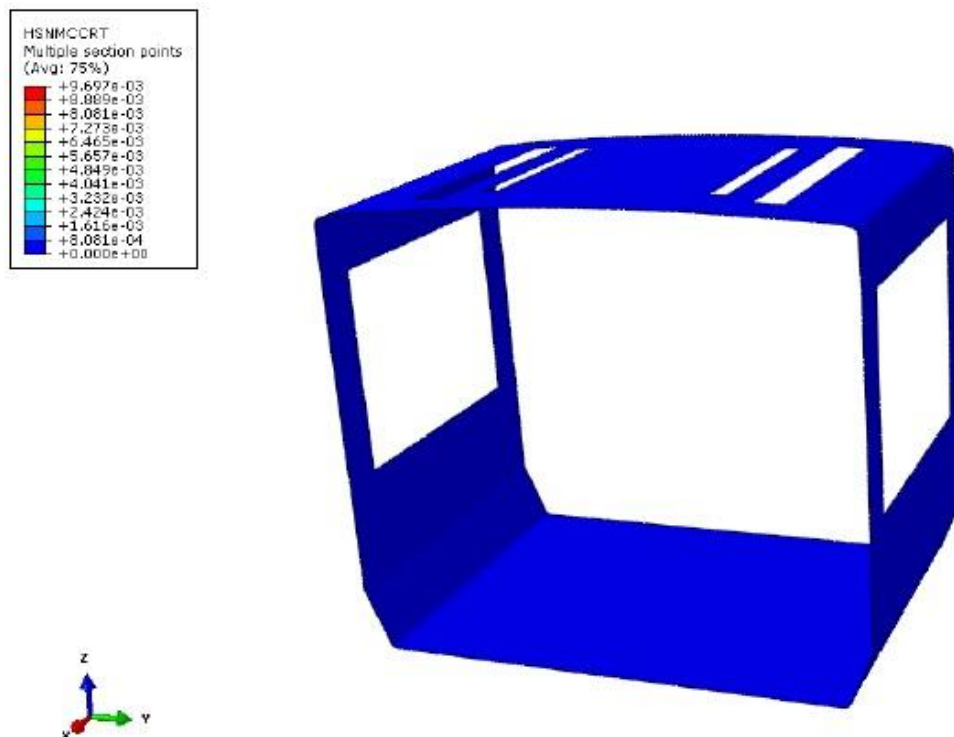


FIGURA 38 - MÓDULO COM REFORÇO, SUJEITO A UMA ACELERAÇÃO LONGITUDINAL DE 0,75 G – FALHA DA MATRIZ À COMPRESSÃO

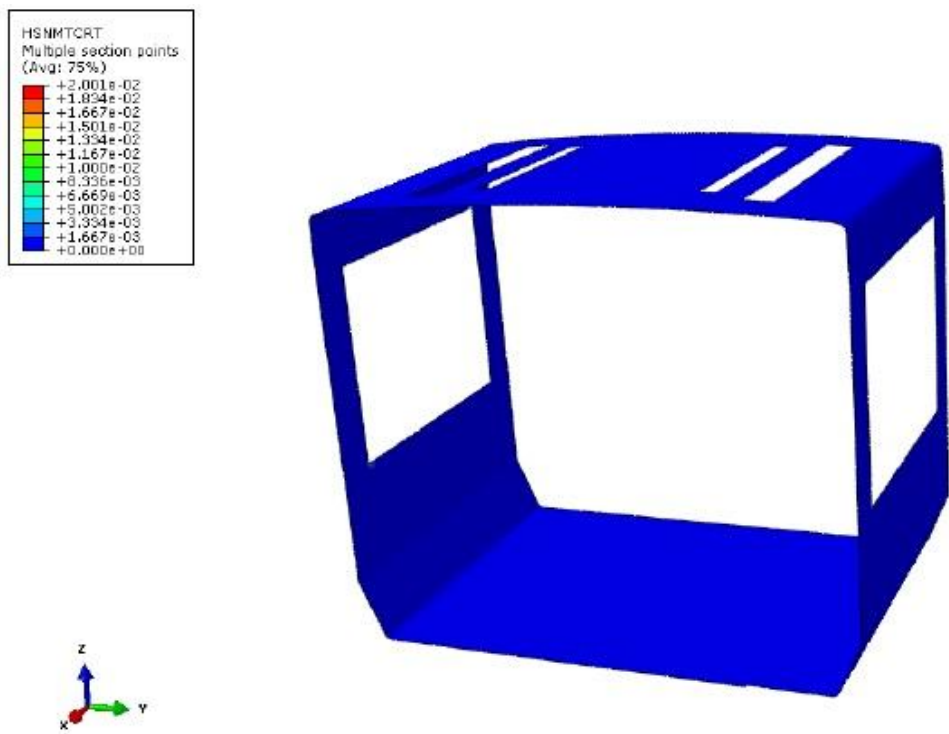


FIGURA 39 - MÓDULO COM REFORÇO, SUJEITO A UMA ACELERAÇÃO LONGITUDINAL DE 0,75 G – FALHA DA MATRIZ À TRAÇÃO